

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ, ЛЕТУЧИЕ КОМПОНЕНТЫ И ЭЛЕМЕНТЫ-ПРИМЕСИ РАСПЛАВОВ ВУЛКАНИЧЕСКОГО ЦЕНТРА ГОРЕЛЫЙ (ЮЖНАЯ КАМЧАТКА) ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ ВКЛЮЧЕНИЙ В МИНЕРАЛАХ

© 2012 г. М. Л. Толстых*, В. Б. Наумов*, М. Г. Гавриленко**,
А. Ю. Озеров**, Н. Н. Кононкова*

* Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН
119991, Москва, ул. Косыгина, 19; e-mail: mashtol@mail.ru, naumov@geokhi.ru

** Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9

Поступила в редакцию 17.11.2010 г.
Принята к печати 24.05.2011 г.

Исследованы расплавные включения во вкрапленниках оливина и плагиоклаза из разновозрастных пород вулканического центра Горелый (Южная Камчатка): магнезиального базальта, андезитобазальтов, андезита, игнимбрита и дацита. Использован метод гомогенизации включений и анализ стекол 100 расплавных включений на электронном микрозонде и 24 включений на ионном микрозонде. Установлен весьма широкий диапазон кремнекислотности расплавов — от 45 до 74 мас. % SiO_2 . Сильно варьируют и содержания других петрогенных компонентов. Выделено 7 типов расплавов, различающихся по содержаниям кремния, натрия, калия, титана и фосфора. Среди расплавов основного состава (45–53% SiO_2) обнаружены калиевые (в среднем 4.2% K_2O , 1.7% Na_2O , 1.0% TiO_2 , 0.20% P_2O_5), натровые (3.2% Na_2O , 1.1% K_2O , 1.1% TiO_2 , 0.40% P_2O_5) и титанистые с высоким содержанием фосфора (2.2% TiO_2 , 1.1% P_2O_5 , 3.8% Na_2O , 3.0% K_2O). Среди расплавов среднего состава (53–64% SiO_2) также встречаются как калиевые (5.6% K_2O , 3.4% Na_2O , 1.0% TiO_2 , 0.4% P_2O_5), так и натровые (4.3% Na_2O , 2.8% K_2O , 1.3% TiO_2 , 0.4% P_2O_5). Среди расплавов кислого состава (64–74% SiO_2) имеются калиевые (4.5% K_2O , 3.6% Na_2O , 0.7% TiO_2 , 0.15% P_2O_5) и натровые (4.5% Na_2O , 3.1% K_2O , 0.7% TiO_2 , 0.13% P_2O_5). Таким образом, отличительной чертой вулканического центра Горелый является постоянное присутствие высококалиевых разностей во всем диапазоне кремнекислотности расплавов. Включения расплавов разных типов иногда обнаруживаются не только в одном и том же образце, но и в одних и тех же вкрапленниках. Натровые и калиевые типы расплавов различаются и по содержаниям хлора и фтора: в натровых расплавах больше хлора, а калиевые расплавы существенно обогащены фтором. Впервые для Курило-Камчатского региона установлены калиевые расплавы с очень высоким содержанием фтора — до 2.7 мас. % при среднем содержании 1.19 мас. % (17 анализов). Для натровых расплавов среднее содержание фтора равно 0.16 мас. % (37 анализов). Микроэлементный состав расплавов отличает обогащенность элементами разных групп — крупноионными литофилами (LILE), редкоземельными (особенно HREE) элементами, высокозарядными элементами (кроме Nb). В целом, все расплавы несут черты геохимического родства. Концентрации элементов закономерно возрастают от основных расплавов к кислым (за исключением содержаний Sr и Eu, что объясняется активным фракционированием плагиоклаза, а также Ti, входящего в рудную фазу). Сведены все опубликованные данные по вулканическим породам Курило-Камчатского региона, при исследовании которых обнаружены расплавные включения с высоким содержанием K_2O ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1$). Сделан вывод о широком распространении высококалиевых расплавов, которые обнаружены на вулканах Авачинский, Безымянный, Большой Семячек, Дикий Гребень, Карымский, Кекукнайский, Кудрявый, Шивелуч, а также в хребтах Валагинский и Тумрок.

Ключевые слова: Камчатка, вулкан Горелый, расплавные включения, летучие компоненты, элементы-примеси.

Вулкан Горелый — крупный долгоживущий вулканический центр Южной Камчатки, сохраняющий эруптивную активность в настоящее время. Вулкан имеет сложное строение: выделяются две постройки — древняя и современная.

Древняя постройка — пра-Горелый — имеет щитовую форму; в центре расположена кальдера диаметром 13 × 12 км. Современная постройка — Молодой Горелый — занимает центральную часть кальдеры и представлена тремя слившимися кону-

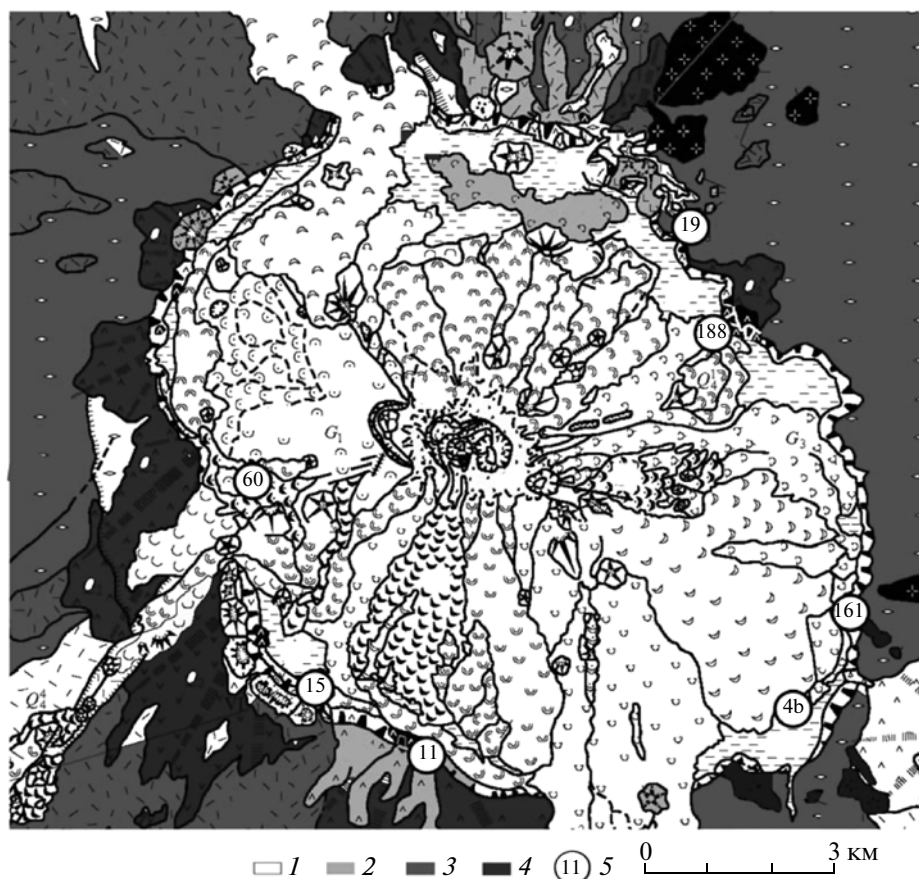


Рис. 1. Геоморфологическая схема вулкана Горелый [2].

1 — породы современного этапа (поздний плейстоцен — поздний голоцен), 2 — породы ранне-посткальдерного этапа (поздний плейстоцен), 3 — породы кальдерообразующего этапа (поздний плейстоцен), 4 — породы докальдерной стадии (поздний миоцен — средний плейстоцен), 5 — точки опробования.

сами. Абсолютная высота центрального конуса — 1829 м. На вершине имеется 11 кратеров, наложенных друг на друга, на склонах — около 40 побочных прорывов с лавовыми потоками. История развития вулканического центра Горелый реконструируется следующим образом [1–3].

Докальдерный этап. В миоцене был заложен древний вулкан пра-Горелый — обширный многовыходной экструзивно-лавовый комплекс, размеры которого составляли примерно 12×15 км. Продукты извержений этого комплекса составляли обширный спектр: дациты и риодациты экструзий и даек, андезиты и дациты основной постройки и базальты и андезитобазальты побочных конусов (рис. 1).

Этап кальдерообразования. Серия грандиозных извержений средне-кислой магмы, сформировавших многослойный покров пемзовых туфов и игнимбритов, опустошила очаг и вызвала обрушение его кровли с образованием кальдеры. Образование кальдеры датировано тефростратиграфическим методом (~38–40 тыс. лет назад) по соотношениям “гореловских” игнимбритов с

аналогичными и субодновременными отложениями кальдеры вулкана Опала на западе. Кальдера вулкана Горелый — типичная структура обрушения типа Кракатау, ограниченная крутопадающими дугowymi разломами-сбросами.

Ранний посткальдерный этап. Следующий этап активности Гореловского центра характеризовался многовыходным вулканизмом, локализованным на гребне кальдерного уступа или внешних склонах кальдеры. Ранний посткальдерный комплекс представлен цепью моногенных вулканических аппаратов: базальт-андезитовых шлаковых конусов, дацитовых экструзий и жерловин.

Современный вулкан Горелый. Вулкан Горелый начал действовать также в ледниковое время сквозь ледник. По-видимому, с этим обстоятельством связано своеобразное оформление двух его ранних конусов — западного (Горелый-1) и среднего (Горелый-2), имеющих у подножий крутые, обрывистые уступы высотой 80–100 м, частично залитые лавами молодых извержений. **Вулкан Горелый-1** сложен породами базальт-андезитового ряда. Объем постройки ~14 км³. Деятельность

Таблица 1. Химический состав (мас. %) изученных пород вулканического центра Горелый

Компонент	Номер образца						
	Гор-161	Гор-46	Гор-188	Гор-15	Гор-60	Гор-11	Гор-19
SiO ₂	51.27	53.51	53.81	55.65	57.17	64.83	66.48
TiO ₂	1.14	1.15	1.11	1.21	1.38	0.84	0.95
Al ₂ O ₃	16.49	16.51	16.90	16.28	15.71	15.69	15.26
FeO	10.04	9.57	9.58	9.39	9.13	4.92	4.37
MnO	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.12	0.14
MgO	7.29	5.92	5.05	4.38	2.88	1.55	1.11
CaO	9.29	8.02	8.19	7.19	6.18	3.50	2.55
Na ₂ O	2.94	3.29	3.14	3.49	3.69	4.81	5.09
K ₂ O	1.06	1.59	1.36	2.05	2.62	2.95	3.09
P ₂ O ₅	0.32	0.40	0.39	0.42	0.54	0.27	0.19
Сумма	100.01	100.13	99.70	100.23	99.47	99.48	99.23

вулкана Горелый-1 завершилась крупным пирокластическим извержением, покрывшим его склоны бугристым плащом бомбово-глыбового андезитового агломерата-агглютината. По-видимому, с этим извержением связано образование венчающего конус крупного (0.7×1.4 км) овального кратера. Жерло *вулкана Горелый-2* было заложено у низкого восточного края описанного кратера вулкана Горелый-1 в начале голоценовой эпохи. Для этой постройки характерна тенденция возвратно-поступательного перемещения центра активности — в ней сочетаются многократерный конус и множество эксцентричных и побочных прорывов. Вулкан Горелый-2 активен и сейчас. Состав пород вулкана Горелый-2 варьирует от базальтов до андезитодацитов, с резким преобладанием промежуточных, андезитобазальтовых разновидностей. К возникновению вулкана Горелый-2 приурочена смена петрографического и генетического типов пород вулкана, отражающая, по-видимому, изменения в структуре и механизме функционирования его магмопитающей системы. *Вулкан Горелый-3* образован на юго-восточном склоне вулкана Горелый-2. Это самый низкий (1698 м) и малообъемный (~ 2 км³) конус в составе общей постройки вулкана. Конус сложен пирокластикой и лавами андезитобазальтового состава.

Побочные прорывы и рифтовая зона вулкана. Гореловский центр отличает сложный характер вулканической активности, сочетающий центральный и трещинный типы извержений. Магмопроводящая структура вулкана, видимо, включает в себя трубообразный магмовод с очагами-раздувами и субкольцевую систему трещинных прорывов, с которыми связана работа побочных моногенных вулканических аппаратов. Начало развития трещинной зоны в описанной конфигурации

относится к доголоценовому времени. Причем роль трещинной системы как элемента магмопроводящей структуры вулкана возрастала с течением времени, и два последних эпизода обильных лавовых излияний андезитобазальтов связаны исключительно с трещинной зоной.

При всем многообразии публикаций, посвященных вулкану Горелый [1–9 и др.], метод изучения расплавных включений использовался в них не слишком широко [4, 5]. Цель настоящей работы заключалась в получении достаточно представительной информации о составе петрогенных и летучих компонентов, а также редких элементов в расплавах, формировавших различные типы вулканических пород. Основным методом в решении этих задач был метод изучения расплавных включений во вкрапленниках пород.

ПОРОДЫ И МИНЕРАЛЫ ВУЛКАНА ГОРЕЛЫЙ

В ходе нашей работы были изучены образцы, относящиеся к разным стадиям активности вулканического центра. *Докальдерная стадия:* магнезиальные базальты побочного прорыва (образец Гор-161), *стадия кальдерообразования:* игнимбри-ты (образец Гор-19), *ранне-посткальдерный этап:* дациты (образец Гор-11), *современный вулкан Горелый:* андезитобазальты древнего и среднего голоцена (образцы Гор-46, Гор-188, Гор-15) и андезиты древнего и позднего голоцена (образец Гор-60). Составы пород приведены в табл. 1. Кроме содержания кремнезема (51–66 мас. % SiO₂), породы различаются и по степени щелочности: базальты и андезитобазальты лежат в поле нормальной щелочности, а андезиты, дациты и игнимбри-ты — в субщелочной области (рис. 2). Кроме того, сильно колеблется содержания MgO (от 1.1

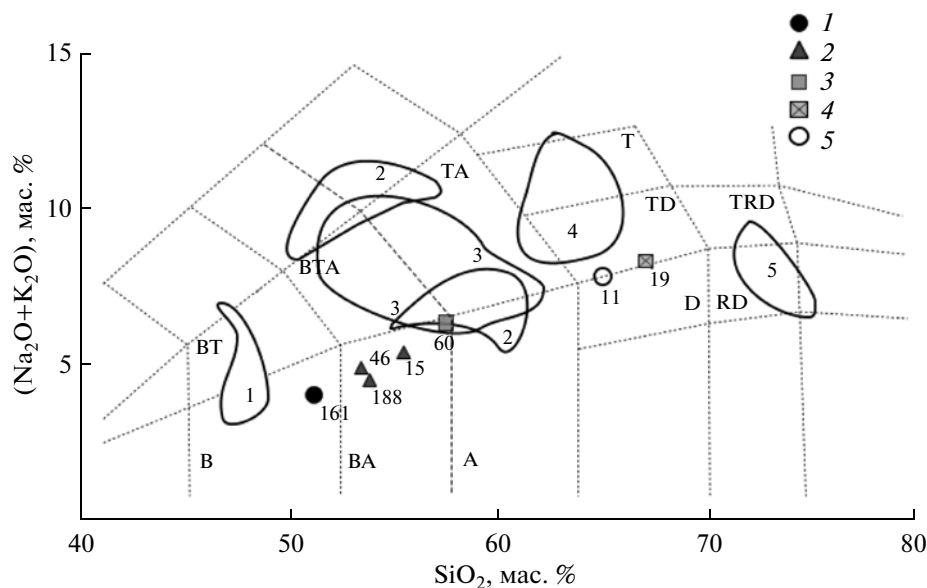


Рис. 2. Диаграмма TAS [10] для пород и расплавов вулканического центра Горелый.

1 – базальт Гор-161, 2 – андезитобазальты Гор-46, Гор-188, Гор-15, 3 – андезит Гор-60, 4 – игнимбрит Гор-19, 5 – дацит Гор-11. Полями обозначены составы расплавных включений в данных образцах. Условные обозначения: В – базальты, ВА – андези-базальты, А – андезиты, D – дациты, RD – риодациты, BT – трахибазальты, BTA – трахиандези-базальты, TA – трахиандезиты, TD – трахидациты, TRD – трахириодациты, Т – трахиты.

до 7.3%) и CaO (2.6–9.3%), причем минимальные содержания этих элементов фиксируются в игнимбриках. В целом, содержания железа, магния и кальция закономерно уменьшаются, а щелочей – возрастают от основных к кислым породам.

Изученные образцы различаются не только по валовому, но и по минеральному составу, различны также и структуры пород. Образец Гор-161 – плотный оливиновый базальт с очень небольшим количеством вкрапленников плагиоклаза и ортопироксена. Все вкрапленники примерно одинаковой размерности погружены в пилотакситовую основную массу. В андезитобазальтах (образцы Гор-46, Гор-188, Гор-15) вкрапленники представлены плагиоклазом, пироксенами и оливином, а основная масса имеет пилотакситовую либо микролитовую структуры. Андезит (образец Гор-60) – пористая, преимущественно плагиоклазовая порода с подчиненным количеством вкрапленников клино- и ортопироксена и реликтами оливина и стекловатой основной массой. Игнимбрит (образец Гор-19) – черно-красная полосчатая порода с редкими вкрапленниками плагиоклаза и пироксенов в стекловатой основной массе. Дациит (образец Гор-11) характеризуется несколько большим количеством вкрапленников того же состава, пористой текстурой и стекловатой основной массой.

Диапазон составов минеральных фаз в породах вулкана довольно широк. *Оливины*. Наиболее магнезиальные разности (Fo_{85}) встречаются в базальтах и в ядерных зонах вкрапленников андези-

тобазальтов. Краевые зоны вкрапленников и микролиты в базальтах, андезибазальтах и андезитах сложены оливином Fo_{70-60} . Наиболее железистые оливины (Fo_{46}) слагают микролиты в андезите (табл. 2). *Плагиоклазы* образуют практически непрерывный ряд составов от самых основных An_{87} в базальте до наиболее кислых An_{35} в игнимбриках. Наиболее распространены плагиоклазы An_{40-55} (табл. 3). *Пироксены*. Пироксены в изученных породах образуют крупные и мелкие вкрапленники, микролиты, а также каймы обрастания по оливину. Причем магнезиальность ортопироксенов в породах разных типов примерно одинакова – En_{70} , в то время как состав клинопироксена варьирует довольно сильно: En_{43-52} , Wo_{21-40} , причем наименее кальциевый из клинопироксенов слагает микролиты в андезите (табл. 4). *Рудные минералы* вкрапленников и микролитов представлены, в основном, титаномagnetитами (табл. 5), исключение составляют включения хромшпинелида во вкрапленниках магнезиального оливина.

ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПЛАВНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Для исследования включений готовили из образцов пород полированные с двух сторон пластинки толщиной 0.3 мм. Пластинки просматривались под микроскопом и из них выбирались вкрапленники с расплавными включениями. Расплавные включения в оливинах и плагиокла-

Таблица 2. Представительные анализы (мас. %) оливинов (вкрапленники и микролиты) в породах вулканического центра Горелый

Компонент	Номер образца							
	Гор-161	Гор-161	Гор-161*	Гор-46	Гор-46	Гор-46	Гор-60	Гор-60*
SiO ₂	40.67	38.39	37.24	39.07	36.21	37.44	37.53	34.58
MgO	44.21	34.70	29.92	44.95	30.35	36.37	34.14	20.32
FeO	13.94	25.84	31.22	16.07	32.50	25.63	27.72	43.12
TiO ₂	0.03	0.00	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.15
Al ₂ O ₃	0.09	0.02	0.05	0.06	0.06	0.03	0.03	0.25
MnO	0.20	0.50	0.62	0.27	0.58	0.51	0.53	0.76
CaO	0.23	0.26	0.28	0.19	0.29	0.24	0.23	0.42
Сумма	99.37	99.70	99.36	100.62	100.01	100.24	100.20	99.60
<i>Fo</i>	85	71	63	83	62	72	69	46

* – микролиты, остальные – вкрапленники.

Таблица 3. Представительные анализы (мас. %) плагиоклазов в породах вулканического центра Горелый

Компонент	Номер образца								
	161	161	161	161*	161*	60	60	60	60*
SiO ₂	45.98	46.59	46.70	50.43	54.34	48.49	52.30	54.05	55.90
TiO ₂	0.03	0.03	0.04	0.03	0.07	0.03	0.09	0.06	0.12
Al ₂ O ₃	33.35	33.19	32.53	30.37	28.06	32.07	29.83	28.53	27.04
FeO	0.52	0.49	0.26	0.81	0.71	0.77	0.93	0.72	1.10
MnO	0.01	0.02	0.01	0.04	0.00	0.00	0.02	0.00	0.03
MgO	0.09	0.15	0.15	0.09	0.15	0.09	0.12	0.13	0.20
CaO	17.58	17.06	16.86	14.10	11.24	15.48	13.15	11.74	10.15
Na ₂ O	1.43	1.79	1.85	3.35	4.93	2.59	3.96	4.83	5.57
K ₂ O	0.05	0.05	0.04	0.20	0.34	0.15	0.26	0.41	0.55
Сумма	99.04	99.37	98.44	99.42	99.83	99.67	100.66	100.45	100.68
An	87	84	83	69	55	76	64	56	49
Ab	13	16	17	30	43	23	35	42	48
Or	0	0	0	1	2	1	1	2	3

Компонент	Номер образца								
	60	46	46*	46	46	19	19	15	11
SiO ₂	57.75	53.16	53.53	54.30	55.35	56.64	57.77	54.45	57.32
TiO ₂	0.10	0.07	0.10	0.05	0.12	0.05	0.04	0.10	0.07
Al ₂ O ₃	26.20	28.53	28.25	27.85	27.30	26.60	25.58	27.37	25.70
FeO	0.92	0.80	1.08	0.81	1.22	0.57	0.46	0.73	0.52
MnO	0.01	0.05	0.00	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.00
MgO	0.15	0.15	0.17	0.15	0.14	0.04	0.06	0.11	0.06
CaO	8.70	11.50	11.69	11.09	10.24	8.91	7.82	10.78	8.72
Na ₂ O	6.34	4.63	4.59	4.87	5.69	6.19	6.60	5.22	6.12
K ₂ O	0.74	0.39	0.41	0.46	0.55	0.49	0.51	0.56	0.44
Сумма	100.91	99.28	99.82	99.61	100.64	99.52	98.86	99.33	98.95
An	41	57	57	54	48	43	38	52	43
Ab	55	41	41	43	49	54	59	45	55
Or	4	2	2	3	3	3	3	3	3

* – микролиты, остальные – вкрапленники.

Таблица 4. Представительные анализы (мас. %) пироксенов вкрапленников и микролитов в породах вулканического центра Горелый

Компонент	Номер образца								
	161	161	46	60	46	60	60*	19*	19
SiO ₂	51.7	37.55	53.04	53.17	49.06	51.27	49.47	53.84	50.96
TiO ₂	0.58	0.02	0.31	0.34	1.35	0.78	1.29	0.30	0.70
Al ₂ O ₃	2.02	0.03	1.00	1.07	3.25	2.28	3.76	0.67	1.77
FeO	9.02	25.71	15.91	17.92	10.34	11.01	16.08	15.64	9.43
MnO	0.31	0.51	0.45	0.53	0.31	0.41	0.52	1.35	0.96
MgO	15.81	33.46	25.7	24.42	14.22	15.45	17.82	25.74	14.79
CaO	18.76	0.23	1.92	2.02	18.37	18.45	9.95	1.54	18.29
Na ₂ O	0.33	0.00	0.02	0.03	0.35	0.34	0.24	0.02	0.45
K ₂ O	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.05	0.02	0.01
P ₂ O ₅	0.00	0.01	0.19	0.16	0.01	0.19	0.32	0.01	0.00
Сумма	98.54	97.53	98.56	99.67	97.27	100.16	99.5	99.13	97.36
<i>Fs</i>	15	30	25	28	17	18	27	25	16
<i>En</i>	46	70	71	68	43	44	52	72	45
<i>Wo</i>	39	0	4	4	40	38	21	3	40

* — микролиты, остальные — вкрапленники.

Таблица 5. Представительные анализы (мас. %) рудных минералов в различных породах вулканического центра Горелый

Компонент	Номер образца								
	Гор-161	Гор-161	Гор-161	Гор-46	Гор-46	Гор-60	Гор-19	Гор-19	Гор-11
SiO ₂	0.09	0.11	0.11	0.36	0.22	0.22	0.04	0.19	0.19
FeO	35.39	33.83	61.20	64.85	69.43	71.65	45.23	71.46	74.74
TiO ₂	1.40	1.07	14.23	18.29	17.46	12.27	45.23	13.12	11.91
Al ₂ O ₃	24.97	26.77	2.89	2.46	2.29	3.84	0.09	1.52	1.53
Cr ₂ O ₃	26.13	26.18	6.42	0.94	0.47	1.07	0.04	0.33	0.10
MnO	0.32	0.29	0.48	0.45	0.50	0.39	1.21	1.16	0.72
MgO	11.24	11.43	2.48	2.50	2.00	3.30	1.82	0.98	1.62
CaO	—	—	0.03	0.18	0.32	0.14	0.01	0.05	—
Сумма	99.54	99.68	87.84	90.03	92.69	92.88	93.67	88.81	90.81

зах различных пород Горелого содержат микрокристаллические дочерние фазы, газовую фазу и остаточное стекло. Для частичной гомогенизации включений применялся муфельный нагреватель [11], причем зерна оливина нагревались с использованием графитового стержня во избежание окисления [12]. Зерна оливинов доводились до температуры 1200–1220°C и выдерживались 10–20 минут. Зерна плагиоклазов из более кислых пород доводились до температуры 1140 (дацит) и 1180°C (андезитобазальты, андезит) и выдерживались 2–5 часов. После выдержки проводилась закалка.

В результате термических экспериментов были получены стекловатые включения (бесцветное стекло в средне-кислых породах, бурое — в базальтах) с газовой фазой, пригодные для исследования на электронном и ионном микрозонде. Отсутствие каймы минерала-хозяина на стенках включения при таком методе подготовки зафиксировано на нескольких профилях (шаг 1 мкм), секущих включения.

Для анализа силикатного стекла и дочерних кристаллических фаз во включениях использован электронный микроанализатор “Самеса SX-100” при следующих условиях: ускоряющее напряже-

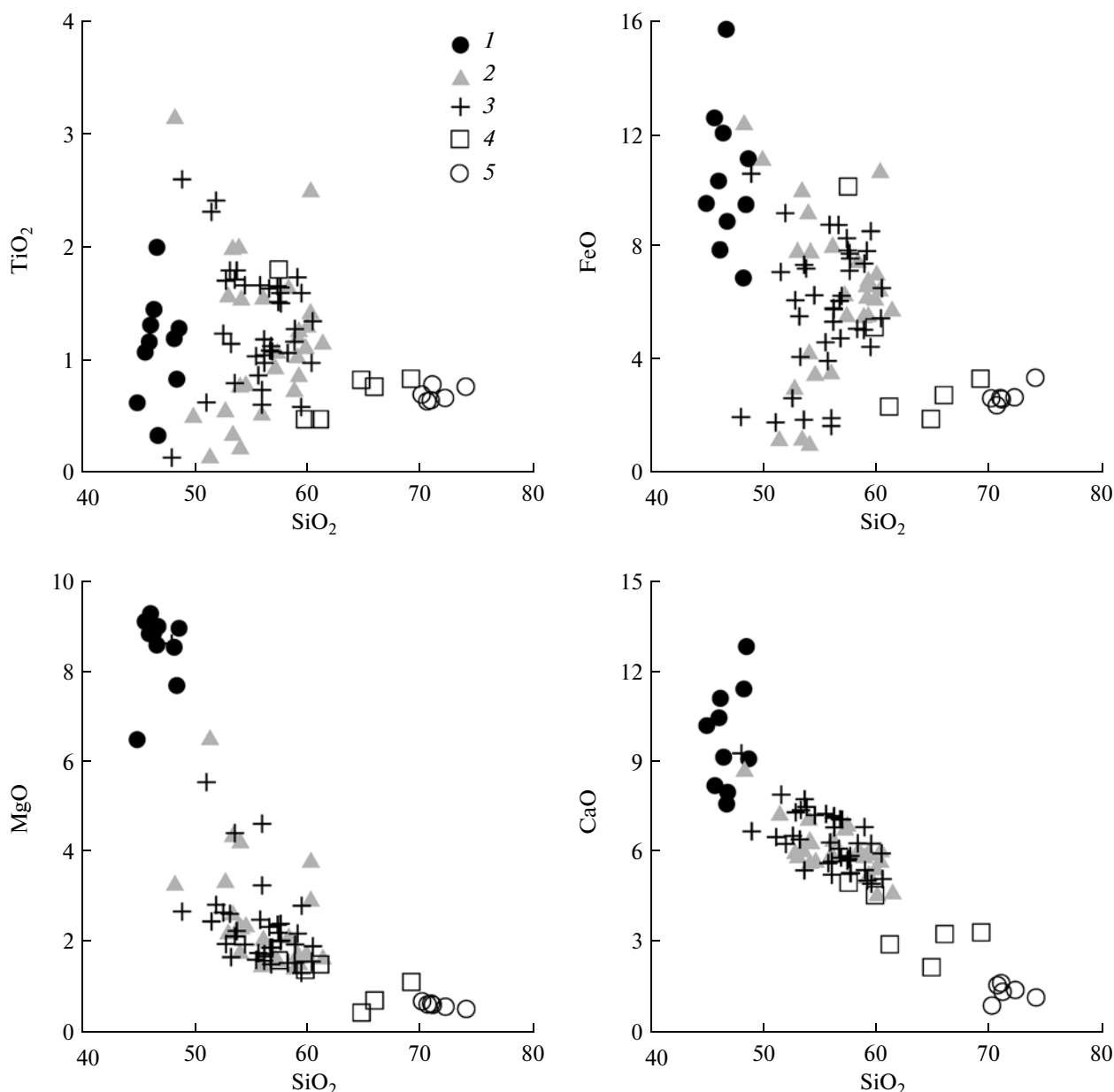


Рис. 3. Вариационные диаграммы для петрогенных элементов в расплавных включениях в минералах различных пород вулканического центра Горелый.

1 – базальт, 2 – андезитобазальт, 3 – андезит, 4 – игнимбрит, 5 – дацит.

ние 15 кВ, ток 30 нА, развертка в растр 12×12 и 5×5 мкм при исследовании стекол, 2×2 мкм при определении кристаллических фаз. Точность определения элементов при их содержаниях >10 мас. % составляла 2 отн. %, при содержаниях 5–10 мас. % – 5 отн. %, при содержаниях <5 мас. % – 10 отн. %. Никакой зависимости состава (в частности, содержания Na_2O) стекла включений от их размеров не обнаружено. Измерения фтора проводили на кристалл-анализаторе ТАР ($2d = 25.745 \text{ \AA}$) по линии FK_α в интегральном режиме, так как на аналитическую линию F нет

наложений линий других присутствующих при данном замере элементов. В качестве стандартного образца сравнения использовался наиболее стабильный и подходящий по составу MgF_2 . Нижняя граница измеряемых концентраций составляла 0.1 мас. %, а среднеквадратичное отклонение в интервале измеряемых концентраций не превышала 10 отн. %

В расплавных включениях размером более 25 мкм содержания воды, фтора и элементов-примесей были определены методом вторично-ионной масс-спектрометрии на ионном микро-

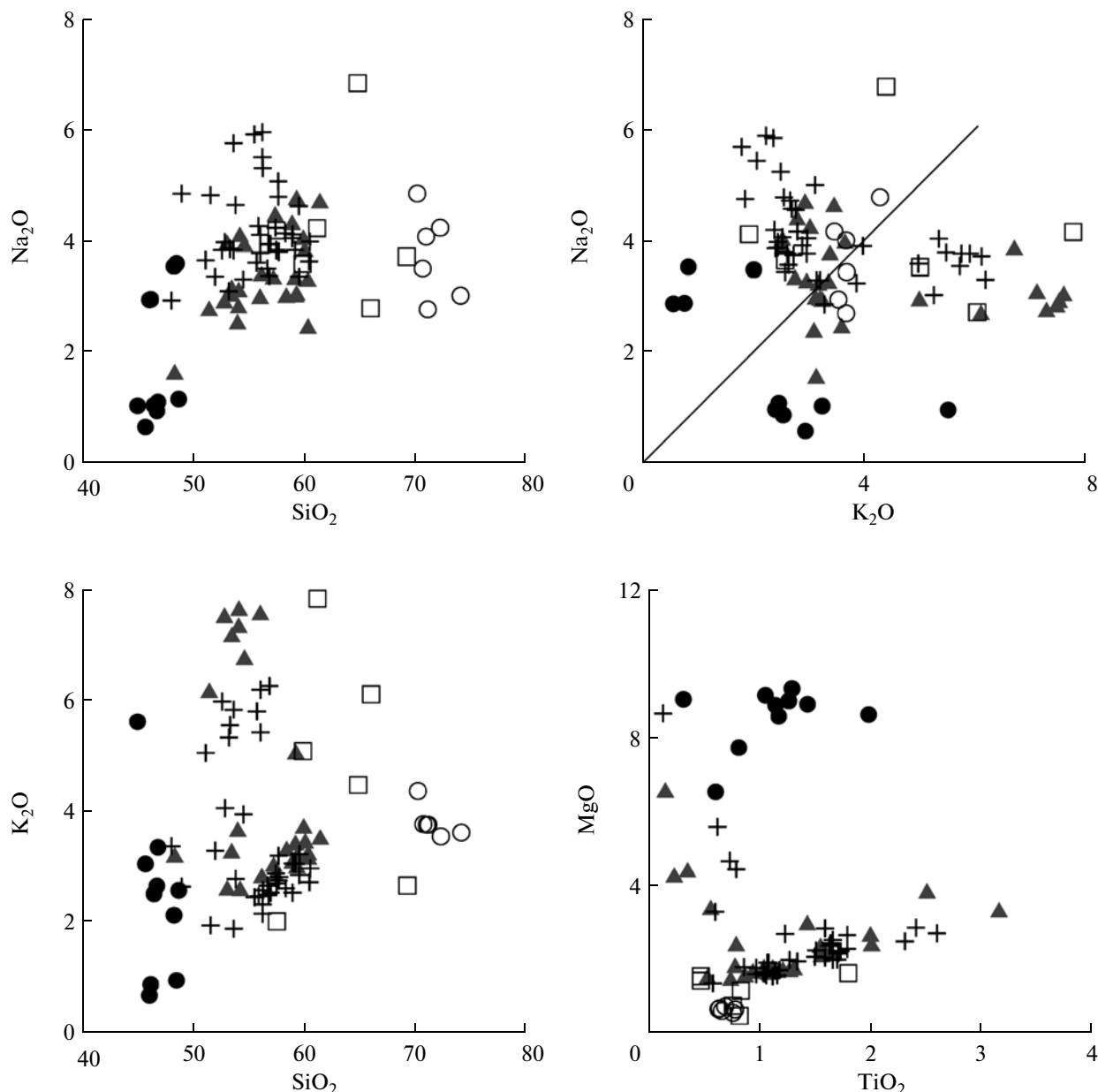


Рис. 3. Продолжение.

анализаторе IMS-4f в Ярославском филиале Физико-технологического института (г. Ярославль) по методике, детально описанной в работах [13–15].

Химический состав включений

I – петрогенные элементы. Расплавы вулканического центра Горелый демонстрируют весьма широкий диапазон кремнекислотности: от 45 до 74 мас. % (табл. 6–8, рис. 2, 3). Довольно велик интервал содержаний в расплавах и некоторых других элементов: TiO_2 0.3–3.3%, MgO 0.2–9.2%, CaO 0.9–12.8%, FeO 1.7–15.7%, Na_2O 0.6–6.1%,

K_2O 0.6–8.2% (табл. 6–8). Прямая или обратная корреляция содержаний этих окислов и кремнезема отражена на рис. 3. Целесообразно характеризовать это множество расплавов, разделив их, согласно общепринятой классификации, на основные, средние и кислые.

Базальтовые расплавы. Расплавные включения основного состава (45–53 мас. % SiO_2) встречаются как в оливинах базальта, так и плагиоклазах андезитобазальтов и андезита, однако эти расплавы имеют совершенно разные составы. В оливинах образца Гор-161 (табл. 6) обнаружены расплавы, соответствующие типичному магнезиальному ба-

Таблица 6. Химический состав (мас. %) стекол расплавных включений в оливинах и плагиоклазах пород вулкана Горелый

Номер включения	Компонент												Сумма	Ol, An*
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cl	S		
Образец Гор-161														
1	44.93	0.60	17.02	9.54	0.17	6.44	10.18	0.96	5.55	0.09	0.02	0.05	95.55	Fo 83
2	45.64	1.05	14.83	12.58	0.22	9.06	8.18	0.58	2.98	0.30	0.00	0.00	95.42	Fo 84
3	46.00	1.14	16.30	10.34	0.11	8.79	10.44	2.88	0.60	0.74	0.00	0.05	97.39	Fo 84
4	46.12	1.29	17.80	7.90	0.17	9.24	11.09	2.89	0.80	0.35	0.05	0.08	97.78	Fo 82
5	46.41	1.43	16.92	12.04	0.19	8.82	9.13	0.97	2.44	0.14	0.00	0.01	98.50	Fo 84
6	46.68	1.98	14.67	15.73	0.25	8.54	7.57	0.87	2.58	0.10	0.00	0.01	98.98	Fo 84
7	46.77	0.31	20.76	8.90	0.17	8.95	7.96	1.03	3.28	0.12	0.00	0.00	98.25	Fo 84
8	48.21	1.17	18.22	6.91	0.10	8.49	11.40	3.49	2.05	0.19	0.04	0.06	100.33	Fo 83
9	48.43	0.81	14.16	9.50	0.14	7.64	12.82	3.54	0.87	0.33	0.11	0.06	98.41	Fo 83
10	48.63	1.26	16.60	11.13	0.23	8.91	9.07	1.08	2.50	0.05	0.00	0.02	99.48	Fo 84
Образец Гор-46														
11	48.21	3.15	14.59	12.45	0.29	3.28	8.76	3.16	1.59	2.31	0.07	0.05	97.91	54**
12	52.93	1.57	15.42	7.93	0.18	2.20	5.88	3.93	2.56	—	0.03	0.01	92.64	59
13	53.87	2.00	15.66	9.28	0.19	2.36	7.13	3.62	2.50	1.13	0.04	0.04	97.82	54
14	54.09	1.54	16.29	7.91	0.17	2.31	6.35	4.07	2.55	—	0.08	0.00	95.36	59
15	56.04	1.55	15.84	8.11	0.17	2.06	6.43	3.37	2.78	—	0.13	0.02	96.50	58
16	58.28	1.64	15.91	7.57	0.16	2.11	6.11	2.98	3.27	0.51	0.10	0.02	98.66	56
17	59.06	1.03	15.99	6.71	0.17	1.73	5.20	3.30	3.38	—	0.07	0.00	96.64	58
18	59.10	1.20	16.62	6.30	0.14	1.67	5.97	5.02	2.99	0.44	0.05	0.05	99.55	59
19	59.79	1.11	15.65	6.24	0.11	1.72	5.48	4.02	3.68	0.33	0.10	0.03	98.26	56
20	60.22	1.42	13.50	6.55	0.20	2.93	5.73	3.27	3.20	0.36	0.06	0.02	97.46	56
21	60.62	1.16	16.25	6.84	0.10	1.70	5.15	3.35	3.22	—	0.08	0.03	98.50	58
Образец Гор-188														
22	53.32	1.99	14.76	10.07	0.21	2.62	6.13	3.00	3.23	0.00	0.03	0.02	95.38	57
23	57.36	1.98	15.85	7.22	0.17	2.19	6.41	3.39	2.80	0.00	0.05	0.04	97.46	57
24	60.24	2.50	10.19	10.75	0.21	3.79	6.08	2.42	3.12	0.00	0.10	0.05	99.45	57
Образец Гор-15														
25	59.74	0.99	16.59	5.18	0.10	1.35	4.55	5.03	3.55	0.49	0.07	0.07	97.71	52
26	59.19	1.26	15.91	6.90	0.10	1.66	5.29	4.74	2.96	—	0.06	0.03	98.10	55

Таблица 6. Окончание

Номер включения	Компонент												Сумма	Ol, An*
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cl	S		
27	59.94	1.30	14.73	7.12	0.11	1.71	4.61	3.81	3.41	—	0.07	0.10	96.94	51
28	61.30	1.15	14.90	5.85	0.10	1.64	4.67	4.68	3.48	—	0.06	0.01	97.84	54
Образец Гор-60														
29	48.83	2.59	14.96	10.62	0.19	2.64	6.68	4.81	2.58	1.39	0.10	0.02	95.41	60
30	51.85	2.40	14.26	9.22	0.20	2.79	6.26	3.31	3.23	1.03	0.12	0.05	94.72	60
31	55.60	0.85	18.35	3.98	0.04	1.72	5.62	3.57	5.75	0.37	0.02	0.02	95.89	60
32	55.76	1.65	15.35	8.81	0.14	2.46	6.31	4.22	2.41	-	0.10	0.00	97.21	66
33	55.92	0.72	20.92	1.95	0.04	4.59	5.67	4.06	5.37	0.43	0.01	0.02	97.70	60
34	56.55	1.62	14.99	8.80	0.19	2.30	6.10	3.46	2.60	—	0.08	0.02	96.71	59
35	57.30	1.64	14.96	8.33	0.17	2.35	5.70	4.19	2.82	—	0.09	0.01	97.56	66
36	57.37	1.50	15.38	7.91	0.16	2.17	5.76	3.79	2.64	—	0.09	0.00	96.77	58
37	57.55	1.63	15.17	7.80	0.16	2.37	5.86	4.75	2.69	—	0.11	0.03	98.12	57
38	57.54	1.58	15.84	7.19	0.19	1.98	5.29	5.03	3.14	0.65	0.09	0.00	98.52	64
39	57.59	1.49	14.01	7.63	0.16	2.00	5.28	3.76	2.75	—	0.08	0.00	94.75	59
40	57.63	1.85	15.65	8.07	0.21	2.33	5.40	3.93	3.06	0.85	0.09	0.04	99.11	57
41	58.84	1.26	15.22	7.45	0.14	1.91	5.39	4.07	3.00	—	0.08	0.01	97.37	59
42	59.06	1.72	13.43	7.89	0.14	2.15	5.04	3.79	2.99	—	0.09	0.02	96.32	57
43	59.42	1.58	14.18	8.58	0.19	2.77	4.93	3.31	3.17	—	0.07	0.03	98.23	57
44	60.41	1.33	15.65	6.58	0.13	1.87	5.09	3.94	2.91	—	0.08	0.01	98.00	62
Образец Гор-19														
45	57.39	1.79	15.84	10.17	0.23	1.56	4.97	4.14	1.95	—	0.09	0.08	98.21	46
46	61.05	0.46	16.91	2.36	0.04	1.47	2.91	4.18	7.79	—	0.00	0.00	97.17	40
47	62.31	0.25	17.01	1.91	0.21	0.98	2.35	5.30	4.99	—	0.00	0.02	95.33	50
48	62.59	0.55	17.72	2.79	0.16	0.61	2.35	4.28	8.20	—	0.00	0.00	99.25	50
49	64.72	0.81	17.23	1.92	0.08	0.40	2.15	4.42	6.81	0.21	0.08	0.02	98.85	42
50	65.88	0.75	17.40	2.77	0.09	0.67	3.26	6.06	2.74	0.13	0.10	0.02	99.87	42
51	69.13	0.82	15.24	3.35	0.13	1.08	3.31	3.67	2.60	—	0.08	0.02	99.43	43
Образец Гор-11														
52	70.07	0.68	12.45	2.66	0.10	0.65	0.87	4.31	4.81	0.14	0.27	0.01	97.02	44
53	70.57	0.62	14.77	2.41	0.09	0.58	1.55	3.46	3.71	0.14	0.17	0.02	98.09	43
54	70.88	0.63	13.44	2.67	0.05	0.60	1.62	4.03	3.70	0.17	0.14	0.02	97.95	43
55	71.02	0.77	12.24	2.62	0.10	0.57	1.33	2.72	3.70	0.21	0.14	0.01	95.43	37
56	72.14	0.65	12.48	2.69	0.10	0.53	1.39	4.19	3.49	0.20	0.16	0.01	98.03	37
57	73.98	0.75	11.97	3.39	0.13	0.48	1.14	2.97	3.56	0.06	0.11	0.02	98.56	39

* — минерал-хозяин: Ol — оливин, An — плагиоклаз, ** — номер плагиоклаза.

Таблица 7. Химический состав (мас. %) стекол расплавных включений в одном вкрапленнике плагиоклаза образца Гор-60

№ вклю- чения	Компонент											Сумма	An
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cl	S	F
*	47.93	0.12	23.33	1.99	0.10	8.59	9.28	2.88	3.31	0.17	0.00	0.00	1.16
1	50.99	0.61	21.66	1.80	0.02	5.51	6.49	3.61	5.00	0.27	0.01	0.01	1.58
2	52.47	1.22	20.88	2.66	0.07	2.62	6.53	3.79	5.93	0.57	0.04	0.03	1.67
3	53.08	1.78	18.68	5.57	0.08	2.59	6.41	3.05	5.28	0.70	0.07	0.02	0.96
4	53.18	1.13	19.14	4.13	0.13	1.63	7.39	3.81	5.50	0.42	0.04	0.00	1.18
5	53.50	0.78	20.40	1.89	0.03	4.38	5.38	3.79	5.78	0.40	0.02	0.01	1.81
6	53.58	1.68	18.33	6.10	0.14	1.91	5.47	3.35	5.10	0.59	0.03	0.02	—
7	54.40	1.65	18.31	6.32	0.14	1.91	7.22	3.26	3.89	0.54	0.09	0.00	0.46
8	55.56	0.92	18.37	5.31	0.10	1.82	5.76	3.98	4.59	0.31	0.02	0.01	—
9	55.91	0.59	20.89	1.67	0.00	3.22	5.23	3.74	6.14	0.34	0.00	0.00	2.70
10	56.73	1.11	18.96	4.79	0.09	1.47	5.80	3.32	6.21	0.39	0.01	0.00	0.88
11	57.04	0.91	18.88	4.26	0.06	1.33	5.77	3.72	4.71	0.23	0.07	0.00	—
12	51.44	2.30	17.08	7.15	0.20	2.42	7.90	4.78	1.88	0.94	0.08	0.03	0.17
13	51.96	2.02	18.11	6.67	0.15	2.22	7.15	5.23	1.77	0.90	0.08	0.01	—
14	53.51	1.70	19.97	7.40	0.19	2.09	7.75	5.72	1.82	0.73	0.07	0.02	0.13
15	53.69	1.78	18.90	7.27	0.14	2.21	7.49	4.60	2.72	0.70	0.07	0.02	0.37
16	55.24	1.02	19.28	4.65	0.15	1.57	7.26	5.88	2.39	0.48	0.07	0.00	0.30
17	56.10	1.03	21.16	5.38	0.05	1.55	7.13	5.92	2.26	0.60	0.07	0.01	0.00
18	56.11	1.17	20.60	5.86	0.08	1.64	7.19	5.47	2.09	0.67	0.05	0.02	0.12
19	56.14	0.96	20.23	5.82	0.17	1.70	6.81	5.27	2.52	0.63	0.07	0.01	0.35
20	56.36	0.97	19.41	4.76	0.07	1.56	6.31	5.23	2.48	0.42	0.06	0.00	—
21	56.49	1.50	17.92	6.11	0.14	1.87	5.96	4.46	2.36	0.62	0.07	0.03	—
22	56.64	1.07	18.68	6.12	0.09	1.84	7.08	3.89	2.43	0.43	0.04	0.02	0.20
23	56.81	0.91	18.98	5.07	0.12	1.70	6.24	5.04	2.58	0.46	0.04	0.05	—
24	56.83	1.06	18.71	6.30	0.11	1.84	7.07	3.90	2.47	0.35	0.07	0.01	0.28
25	57.07	0.94	19.20	4.94	0.09	1.55	6.26	4.67	2.26	0.22	0.06	0.01	—
26	57.25	0.99	18.99	4.84	0.12	1.43	6.04	4.44	2.54	0.36	0.04	0.00	—
27	57.91	0.81	19.32	4.76	0.10	1.40	6.07	4.20	2.28	0.28	0.05	0.00	—
28	58.20	1.05	19.18	5.13	0.10	1.50	6.28	4.09	2.55	0.41	0.05	0.03	0.33
29	58.80	1.15	19.03	5.09	0.09	1.50	6.82	4.00	2.47	0.59	0.05	0.02	0.15
30	58.84	1.21	17.97	4.85	0.16	1.61	5.22	4.03	2.97	0.24	0.06	0.03	0.60
31	59.39	0.57	20.16	4.48	0.08	1.28	6.27	4.58	2.79	0.21	0.04	0.01	0.39
32	60.31	0.96	19.99	5.50	0.06	1.53	5.94	3.59	2.66	0.52	0.05	0.00	0.00
33	52.73	1.69	17.77	6.14	0.08	1.92	7.31	3.93	4.00	0.51	0.04	0.02	0.40

Примечание. * — анализ основной массы на краю вкрапленника.

Таблица 8. Химический состав (мас. %) стекла расплавных включений в одном вкрапленнике плагиоклаза (An 61) образца Гор-188

№ вклю- ения	Компонент													Сумма
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cl	S	F	
Расплавы с K ₂ O/ Na ₂ O > 1														
*	51.31	0.14	23.38	1.24	0.00	6.51	7.30	2.74	6.13	0.03	0.00	0.00	1.57	100.35
1	52.67	0.55	22.01	3.07	0.01	3.34	6.02	2.88	7.49	0.16	0.00	0.00	0.99	99.19
2	53.34	0.34	22.11	1.26	0.01	4.36	6.09	3.12	7.14	0.21	0.01	0.00	1.44	99.43
3	53.97	0.77	20.95	4.32	0.03	1.77	6.42	2.79	7.31	0.31	0.06	0.00	0.78	99.48
4	53.99	0.22	22.84	1.07	0.02	4.22	5.69	3.08	7.62	0.11	0.01	0.01	1.52	100.40
5	54.49	0.78	19.97	3.56	0.02	2.36	5.73	3.90	6.73	0.33	0.00	0.01	0.24	98.12
6	55.90	0.52	21.02	3.62	0.07	1.47	5.97	2.96	7.54	0.12	0.04	0.00	0.61	99.84
7	59.19	0.86	17.99	5.65	0.17	1.52	6.02	3.02	3.15	0.19	0.05	0.03	0.69	98.53
Расплавы с K ₂ O/ Na ₂ O < 1														
8	57.10	0.93	19.14	6.39	0.16	1.62	6.80	3.31	2.99	0.41	0.06	0.00	0.38	99.29
9	57.28	1.07	19.76	5.65	0.10	1.59	6.94	4.44	2.82	0.34	0.03	0.04	0.55	100.61
10	58.79	0.73	17.66	5.62	0.13	1.42	5.88	4.29	3.05	0.22	0.06	0.03	0.55	98.43

Примечание: * — анализ основной массы на краю вкрапленника.

зальту (в мас. %): 45–49% SiO_2 , 6.4–9.2% MgO , 7.6–12.8% CaO и 6.9–15.7% FeO . Концентрации титана и глинозема сравнительно невелики. Эти магнезиальные базальты можно разделить на 2 группы по соотношению щелочей. В *калиевой* группе, где $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$ (6 включений, табл. 6), содержание $\text{K}_2\text{O} = 2.4\text{--}5.6\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 0.6\text{--}1.1\%$. В *натровой* группе (4 включения, табл. 6) содержания $\text{Na}_2\text{O} = 2.9\text{--}3.5\%$, а $\text{K}_2\text{O} = 0.6\text{--}2.1\%$. Содержания SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , MgO в этих двух типах расплавов одинаковы, но различны содержания FeO (11.7 и 8.7% соответственно) и CaO (8.7 и 11.4% соответственно). Существенное различие фиксируется по содержаниям летучих — хлора и серы: в калиевых расплавах они минимальны (в среднем, в мас. % $\text{Cl} = 0.00$, $S = 0.02$), в натровых они заметно выше (в среднем, в мас. % $\text{Cl} = 0.05$, $S = 0.06$).

Базальтовый *высокотитанистый* расплав из включений в плагиоклазах андезитобазальта (образец Гор-46) и андезита (образец Гор-60) имеет довольно экзотический состав (табл. 6): при кремнекислотности 48–52 мас. % концентрации магния в нем невелики (2.6–3.3% MgO), зато высоки содержания титана (до 3.2%), железа (до 12.5%) и фосфора (до 2.3%).

Расплавы среднего состава (53–63 мас. % SiO_2) по соотношению щелочей тоже можно разделить на две группы. *Калиевые расплавы среднего состава* обнаружены в плагиоклазах андезитобазальта (Гор-188), андезита (Гор-60) и игнимбрита (Гор-19). Их особенность — не только высокие концентрации K_2O (до 8.2%), но и высокая глиноземистость — 16–23% Al_2O_3 , низкие содержания титана и железа 0.9 и 1.7–5.2% соответственно. Содержания же кальция и натрия совпадают с таковыми в обычных андезитовых расплавах, что не позволяет предположить захват плагиоклаза-хозяина при анализе на электронном микрозонде. Еще одной яркой особенностью калиевых расплавов среднего состава является высокое содержание фтора (до 2.7 мас. %, табл. 7, 8).

Натровые (андезитобазальтовые и андезитовые) расплавы среднего состава обнаружены в плагиоклазах разновозрастных андезитобазальтов (образцы Гор-46, Гор-188, Гор-15), андезита (образец Гор-60) и игнимбрита (Гор-19) вулкана Горелый. Несмотря на значительный диапазон концентраций петрогенных элементов в этих расплавах, на вариационных диаграммах (рис. 3) они образуют единое поле, которое сложно дифференцировать: SiO_2 53–61 мас. %, TiO_2 1.3–2.5%, FeO 6.3–10.1%, MgO 1.6–2.9%, Al_2O_3 11–16%, K_2O 2.5–5.0%.

Расплавы кислого состава (64–74 мас. % SiO_2) встречаются во включениях (табл. 6) в плагиоклазах игнимбрита (образец Гор-19) и дацита (образец Гор-11). Среди них есть и высококалиевые (до

6.8% K_2O), и высоконатровые (до 6.1% Na_2O) разновидности. Стоит еще отметить, что кислые расплавы из игнимбрита образца Гор-19 отличаются чуть большей основностью (65–69% SiO_2), высокая глиноземистость (15.2–17.4% Al_2O_3) и высокие содержания CaO (2.2–3.3 мас. %). Включения из дацита образца Гор-11 — более типичные кислые расплавы (70–74% SiO_2) с низкими содержаниями глинозема (12.0–14.8%) и CaO (0.9–1.6%).

Таким образом, среди всего многообразия изученных расплавов вулканического центра Горелый можно выделить 7 типов, различающихся по содержаниям кремния, натрия, калия, титана и фосфора. Их средние составы с данными о количестве анализов расплавных включений приведены в табл. 9 и отражены на рис. 4.

Более детально следует остановиться на результатах анализов расплавных включений, отраженных в табл. 7, 8 и на рис. 5, 6. При анализе включений на электронном микрозонде в одну и ту же смену в двух зернах плагиоклаза из разных образцов (Гор-60 и Гор-188) были зафиксированы расплавы как существенно калиевого, так и существенно натрового составов (рис. 5). Никакой зависимости состава включений от их морфологии или расположения в зерне не обнаружено. При последующей дошлифовке и выведении на поверхность этих зерен очередной группы включений ситуация повторилась.

Всего в образце Гор-60 проанализировано 33 включения, а в образце Гор-188 — 10 включений. Первое, на что надо обратить внимание, это значительная разница в содержаниях SiO_2 в этих включениях. В образце Гор-60 для расплавов с преобладанием калия содержания SiO_2 изменяются от 51.0 до 57.0 мас. %, а для расплавов с преобладанием натрия — от 51.4 до 60.3 мас. % (табл. 7). Для расплавов с преобладанием калия существенно различие в разных включениях и в содержаниях FeO : в образце Гор-60 они варьируют от 1.7 до 6.3 мас. %, а в образце Гор-188 — от 1.1 до 5.7 мас. % (табл. 7 и 8). Самым неожиданным оказались результаты анализа фтора в этих включениях. Содержания фтора оказались намного выше в калиевых расплавах по сравнению с натровыми расплавами. Так в образце Гор-60 в калиевых расплавах содержания фтора колеблются от 0.46 до 2.70 мас. % при среднем для 8 включений 1.40 мас. %, а в натровых расплавах они не превышают 0.60 мас. % при среднем 0.24 мас. % (14 включений). В образце Гор-188 содержание фтора также выше в калиевых расплавах (в среднем 0.90 мас. %) по сравнению с натровыми расплавами (в среднем 0.49 мас. %). Отметим также, что при анализе на электронном микрозонде включений с высоким содержанием фтора в образце Гор-60 (включения 1, 2, 4, 5, 16 в табл. 7) в эту же смену изучались расплавные включения в

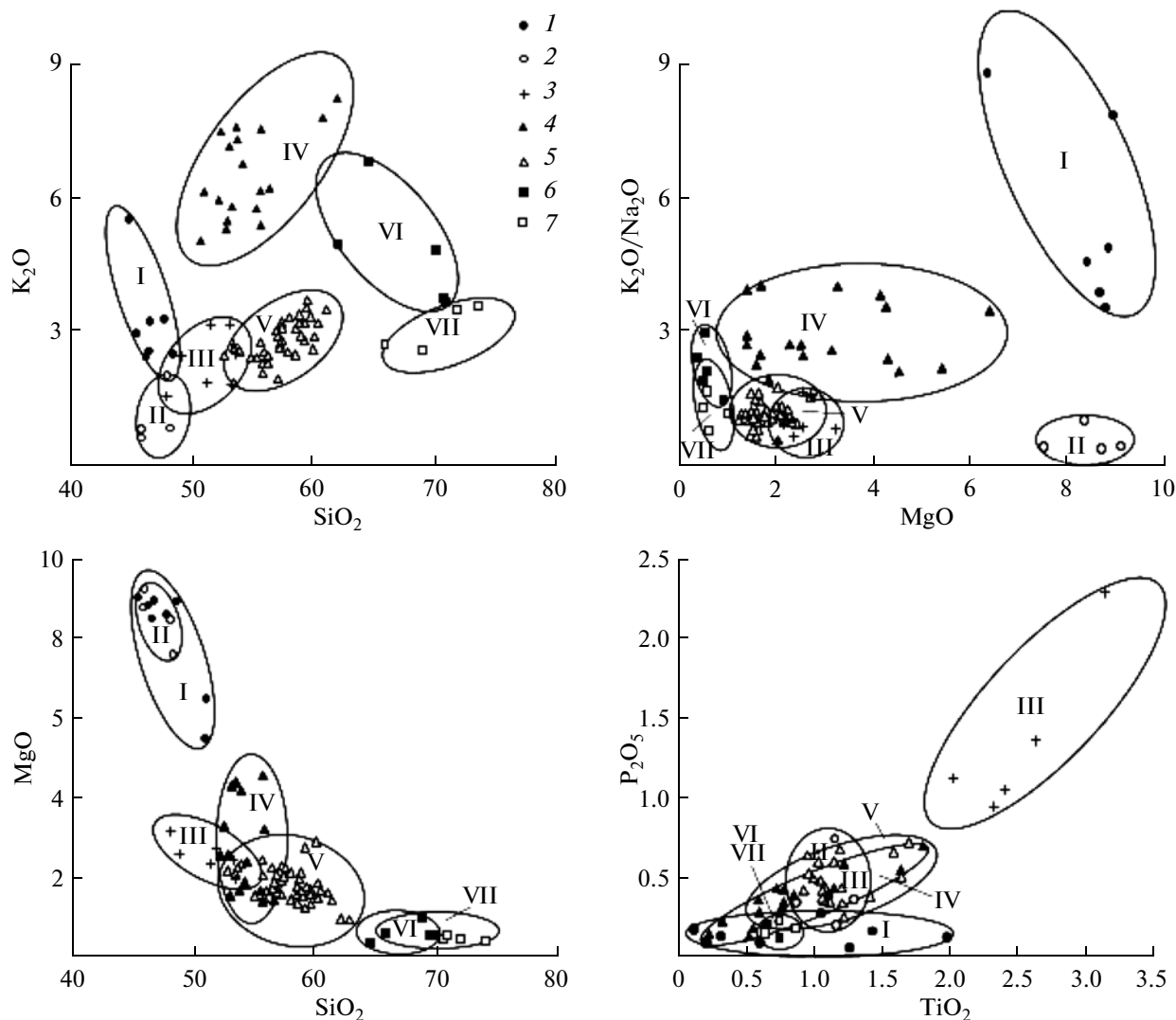


Рис. 4. Вариационные диаграммы для расплавов вулканического центра Горелый.

Полями обозначены следующие типы расплавов: I – основной калиевый расплав, II – основной натровый расплав, III – основной расплав с высоким содержанием фосфора и титана, IV – средний калиевый расплав, V – средний натровый расплав, VI – кислый калиевый расплав, VII – кислый натровый расплав.

кварце и плагиоклазе из вулканических пород Бая-Маре (Румыния). В последних содержание фтора или не было зафиксировано, или оно не превышало 0.12 мас. %. При последующем анализе двух включений в кварце на ионном микрозонде содержание фтора в расплавах составило 173 ppm и 201 ppm. Все это свидетельствует об отсутствии аналитических погрешностей при работе на электронном микрозонде.

II – элементы-примеси. Результаты анализов расплавных включений на ионном микрозонде, полученные после их анализа на электронном микрозонде, представлены в табл. 10 и 11. В целом, расплавы вулканического центра Горелый отличаются высокие концентрации элементов-

примесей, в первую очередь крупноионных литофильных, а также высокочargedных элементов (не считая дефицита Nb, характерного для островодужных систем). Также довольно значительны концентрации HREE. Чтобы убедиться, что эти концентрации действительно отвечают расплавам во включениях, были определены содержания этих же элементов в плагиоклазе-хозяине. Результаты отражены в табл. 12. Некоторые особенности микроэлементного состава расплавов разных групп подтверждают оправданность выделения этих групп в общей массе расплавов вулкана Горелый. К сожалению, значительная статистика по данным об элементах-примесях в расплавных стеклах изученного вулкана отсутствует, поэтому

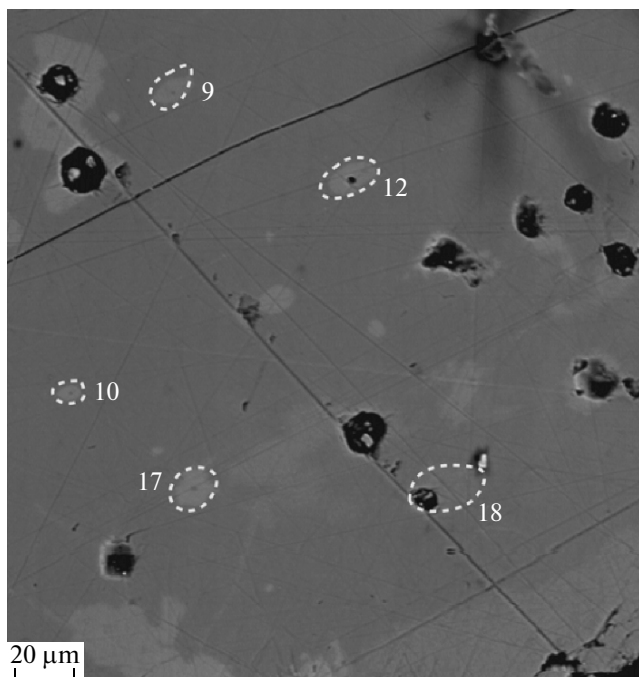


Рис. 5. Часть поверхности вкрапленника плагиоклаза с расположением проанализированных на микрозонде расплавных включений с различным содержанием калия и фтора (включения 9, 10 и 12, 17, 18 в табл. 7).

зачастую приходится опираться на единственный анализ стекла данного типа. Попробуем перечислить наиболее яркие особенности геохимии расплавов вулканического центра Горелый.

Есть определенная специфика в поведении некоторых LILE (крупноионных литофильных элементов). Отметим довольно высокие содержания **лития**. Во всех базальтовых и в кислых расплавах средние его концентрации не превышают 40 ppm, зато в натровых андезитовых расплавах содержания лития доходят до 220 ppm (среднее — 92 ppm). Заметные различия обнаруживаются в концентрациях **рубидия**: максимальных значений они достигают в калиевых андезитовых расплавах (>100 ppm), чуть меньшее количество этого элемента содержат кислые расплавы (в среднем 75 ppm), калиевые базальтовые расплавы и натровые андезитовые расплавы — 50 ppm, прочие базальтовые расплавы — около 20 ppm.

Концентрации высоkozарядных элементов закономерно растут от основных к кислым расплавам, увеличиваясь в среднем в 3–4 раза. Специфическим для пары **Th–U** можно считать их аномально низкие содержания в натровых базальтовых расплавах (0.50 ppm Th, 0.23 ppm U), что приближается к показателям E-MORB нормативного состава. В остальных типах расплавов эти содержания выше (1.33–6.63 ppm Th, 0.59–3.11 ppm U).

Специфически ведет себя **бор**. Среднее содержание бора в калиевых базальтовых расплавах — 690 ppm, причем в расплавах остальных групп это значение не превышает 55 ppm. Значительные концентрации **хрома** обнаружены в магнезиальных базальтовых расплавах — в среднем 610 ppm. Эта величина превышает содержания хрома в титанистых базальтовых расплавах, а также натровых средних и кислых расплавах почти в 40 раз! Чуть более заметна хромистость в калиевом андезитовом расплаве — около 40 ppm.

Можно отметить относительно невысокие содержания воды в расплавах, о чем свидетельствуют высокие суммы анализов стекол включений на электронном микрозонде. В среднем эти суммы составляют ~98 мас. %. Несколько анализов воды с помощью ионного микрозонда (табл. 11) подтверждают этот вывод — концентрации не превышают 0.8 мас. %. Отметим также чрезвычайно высокие содержания F (>1 мас. %) в высококалиевых расплавах среднего состава. Концентрации хлора, как правило, более высокие в натровых расплавах по сравнению с калиевыми расплавами. Что касается серы, то значимых ее содержаний не обнаружено ни в одном из типов расплавов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Итак, результаты, полученные по расплавленным включениям в минералах вулканического центра Горелый, предоставили весьма обширную информацию.

Соотношение расплавов и пород. Породообразующие расплавы, из которых кристаллизовались вкрапленники изученных пород, гораздо сильнее варьируют по составу, чем сами породы. Расплавы базальтов и частично расплавы игнимбриотов содержат меньше кремнезема, а расплавы андезитобазальтов и дацитов — существенно больше кремнезема, чем породы, в которых эти включения обнаруживаются. Что же касается игнимбриотов и андезитов, то в них содержатся как более основные, так и более кислые, чем породы, расплавные включения (рис. 2). Включения одного и того же типа расплавов могут встречаться в породах разной основности, но в то же время включения расплавов различных типов могут обнаруживаться не только в одном и том же образце, но и в одном и том же вкрапленнике (табл. 7, 8, рис. 5, 6). Таким образом, можно констатировать, что а) валовой состав породы не аналогичен составу расплава, из которого формируются вкрапленники, б) любая из изученных нами пород является кумулатом, в) большинство пород является результатом смешения магматических расплавов, о чем свидетельствует сочетание в одном образце вкрапленников, формировавшихся в разных условиях из разных расплавов. Не исключено, что

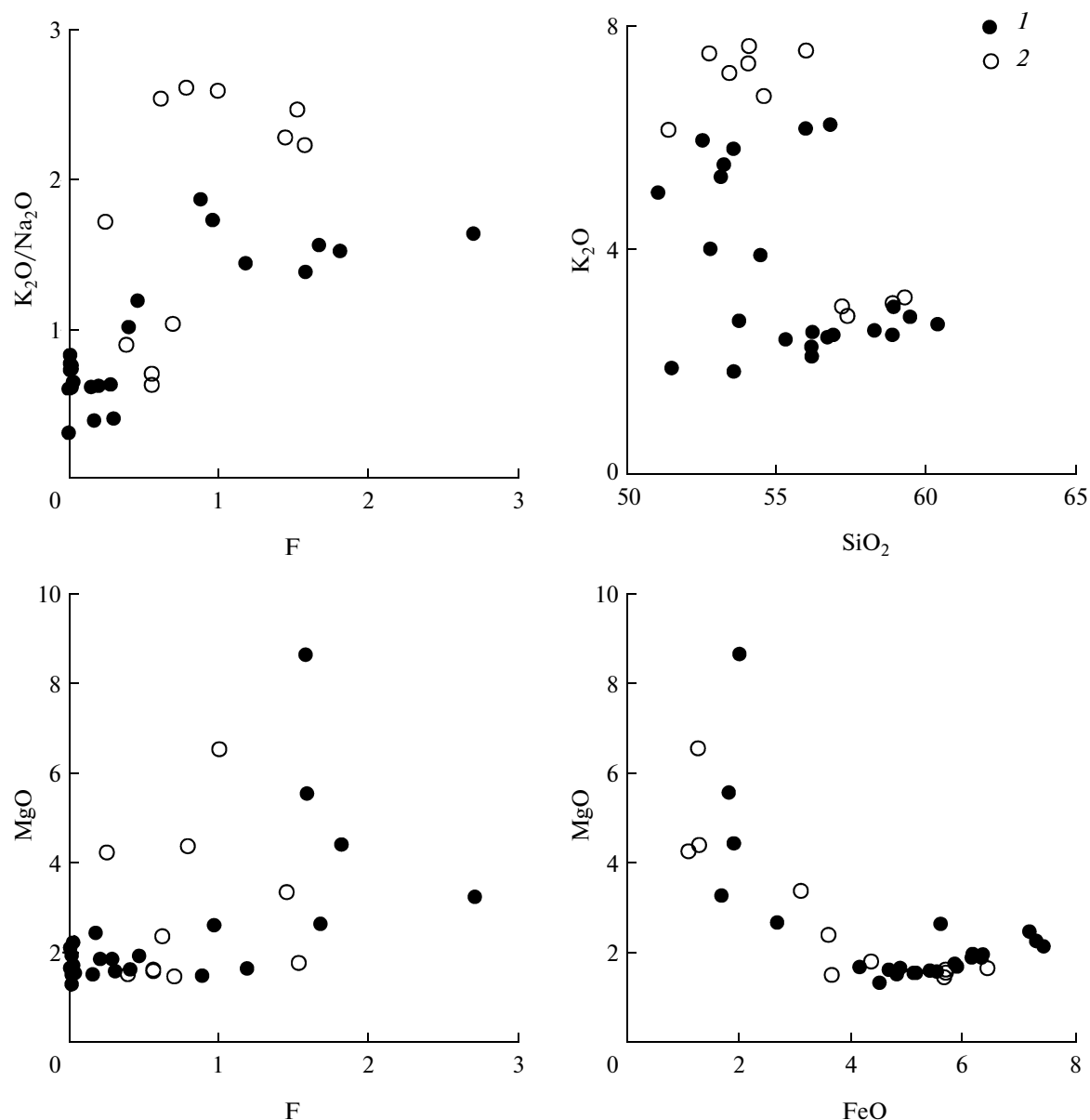


Рис. 6. Вариационные диаграммы для составов расплавных включений в одном вкрапленнике плагиоклаза (1 — образец Гор-60, 2 — образец Гор-188).

смешивались не только продукты кристаллизации разных расплавов, но и сами расплавы. Сходные выводы о гибридном генезисе базитовых пород Горелого, полученные на основе петрографического их изучения, представлены в работе А.Б. Перепелова [6]. Наличие включений разных расплавов в одном вкрапленнике может свидетельствовать о том, что история существования отдельных вкрапленников может быть весьма сложной — длительный рост в постепенно меняющемся расплаве или механическое перемещение кристалла в неоднородном очаге. Аналогичный вывод был сделан нами ранее [16] при изучении андезитов вулкана Безымянный (Камчатка).

Были изучены расплавные включения в плагиоклазах различных годов извержений (1956, 1974, 1979, 1985 и 1987 г.г.). Включения различных составов, в том числе низко- и высококалиевых, (SiO_2 — от 56 до 78 мас. %, с закономерным различным содержанием других элементов) располагаются часто в одном вкрапленнике, чрезвычайно близко друг от друга.

Обращает на себя внимание большой диапазон содержаний петрогенных элементов в этих включениях, в частности, SiO_2 , FeO, MgO, K_2O , F, причем наиболее магнезиальные разности обогащены калием и фтором. Такой набор элементов позволяет предполагать флогопит-содержащие

Таблица 9. Химический состав (мас. %) различных типов расплавов вулканического центра Горелый

Компонент	Тип расплава						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
SiO ₂	49.25	47.19	51.66	56.22	57.80	70.07	69.51
TiO ₂	1.00	1.10	2.17	1.00	1.26	0.73	0.71
Al ₂ O ₃	18.37	16.62	16.28	18.58	17.22	13.73	14.64
FeO	8.61	8.66	8.34	4.60	6.46	2.60	2.87
MnO	0.14	0.13	0.17	0.09	0.14	0.10	0.09
MgO	6.91	8.54	2.50	2.36	1.83	0.54	0.72
CaO	7.90	11.44	7.05	5.63	5.93	1.41	2.40
Na ₂ O	1.75	3.20	3.98	3.44	4.32	3.58	4.49
K ₂ O	4.19	1.08	2.83	5.53	2.78	4.52	3.13
P ₂ O ₅	0.20	0.40	1.11	0.35	0.44	0.15	0.13
Cl	0.01	0.05	0.07	0.04	0.07	0.15	0.12
S	0.02	0.06	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02
Сумма	98.35	98.47	96.20	97.85	98.27	97.60	98.83
<i>n</i>	9	4	9	22	47	5	4

Примечание. I–III – базальтовые расплавы (I – высококалиевый, II – натровый, III – кали-натровый с высоким содержанием титана и фосфора и низким содержанием магния); IV, V – андезитовые расплавы (IV – высококалиевый, V – натровый), VI, VII – дацитовые расплавы (VI – калиевый и VII – натровый); *n* – количество изученных включений.

породы в качестве источника одного из расплавов, а все их разнообразие, сконцентрированное в пределах вкрапленника, считать результатом взаимодействия этого расплава с более кислым, железистым и натровым вмещающим расплавом. Высококалиевые расплавы со значительным содержанием фтора были ранее установлены при изучении мантийных пород (лампроитов) Западной Австралии [17, 18] и Испании [19]. В магматических включениях в оливинах этих пород содержания K₂O достигали 8.8–13.5 мас. %, а содержания F – 0.49–1.43 мас. %. Такие же высококалиевые (K₂O = 5.4–6.4 мас. %) расплавы с высоким содержанием фтора (0.58–1.27 мас. %) обнаружены при анализе стекол в ксенолитах вулкана Стромболи, Италия [20]. Аналогичные по составу расплавы (K₂O = 4.5–8.2 мас. %, F – 0.32–0.75 мас. %) установлены в 11 расплавных включениях в оливинах (*Fo* = 86.8–90.7) из двух вулканов южной Италии [21], что позволило авторам этой работы сделать вывод о мантийном источнике богатых калием магм.

Соотношение расплавов различных типов. Можно ли выявить эволюционные взаимосвязи между расплавами различного состава в этой единой магматической системе? На вариационных диаграммах (рис. 3) видно, что содержания магния, железа, кальция в расплавах падают с ростом содержания SiO₂. Точки на графиках FeO–SiO₂ или CaO–SiO₂ образуют практически непрерывный тренд, но содержания MgO во включениях из

оливинов значительно выше, чем в остальных расплавах, даже основных. Такой скачок едва ли может быть объяснен исключительно фракционированием темноцветных минералов. Вообще стоит особо отметить масштаб вариаций составов магнезиальных базальтовых расплавов из оливинов: при совсем незначительных отличиях SiO₂ больше чем в два раза различаются концентрации титана, железа, кальция, натрия и калия.

Весьма сложные зависимости выявляются на графиках TiO₂–SiO₂, Na₂O–SiO₂, K₂O–SiO₂ (рис. 3). Максимальные концентрации титана фиксируются в основных расплавах из андезита и андезитобазальтов, а минимальные – в основных магнезиальных и кислых расплавах. Что касается щелочей, главным образом, калия, то здесь на графике можно наблюдать очень широкий диапазон концентраций при незначительном изменении SiO₂. Не фиксируется однозначного накопления калия в более дифференцированных разностях: максимальные показатели по содержаниям калия демонстрируют расплавы из игнимбритов, а не наиболее дифференцированные расплавы из дацита.

Парные вариационные диаграммы демонстрируют: а) наличие возможной генетической связи между расплавами/породами, б) невозможность все соотношения пород объяснить только процессом фракционирования родоначального расплава, если в качестве него принять магнезиальные базитовые расплавы из образца Гор-161.

Таблица 10. Содержания фтора (мас. %) и элементов-примесей (ppm) в расплавах включений в оливине и в плагиоклазе пород вулканического центра Горелый

Компонент	Гор-161	Гор-161	Гор-161	Гор-161	Гор-60	Гор-60	Гор-60	Гор-46	Гор-11	Гор-11	Гор-11
	2*	8	10	10	29	35	35	18	59	60	64
F	0.278	0.060	0.012	0.010	0.002	2.26	3.15	0.060	0.009	0.008	0.035
Li	41.7	24.7	29.9	25.5	122	23.5	20.4**	36.7	45.8	24.9	35.7
Be	1.09	0.60	0.87	0.80	1.72	0.70	0.69	1.50	2.28	2.34	2.33
B	649	4.00	483	925	45.6	54.5	32.5	19.7	36.6	26.8	28.7
Cr	208	166	423	1640	28.7	46.6	30.2	14.1	4.80	3.74	10.5
Rb	49.3	17.7	48.3	51.5	61.0	109	104	52.3	96.5	83.5	72.5
Sr	243	538	427	441	371	482	434	375	29.2	114	113
Y	28.1	20.7	20.3	21.6	88.1	13.0	14.1	31.5	45.1	49.1	37.8
Zr	140	74.4	114	99.5	597	109	117	171	471	473	355
Nb	5.58	2.41	3.04	2.66	22.4	3.37	3.81	6.25	13.4	16.8	11.6
Ba	496	276	251	259	828	1310	1110	733	617	797	685
La	14.2	8.35	8.30	12.4	38.5	7.75	8.39	18.6	28.2	36.6	23.0
Ce	35.0	21.1	19.1	25.8	102	17.7	19.7	42.9	64.6	85.5	50.8
Nd	21.9	15.1	11.1	14.4	63.7	9.80	11.0	25.4	33.9	43.6	27.5
Sm	5.26	3.79	3.00	3.00	15.9	2.38	2.76	5.96	7.09	9.33	5.65
Eu	1.53	1.12	1.18	1.12	2.68	0.84	0.55	2.09	0.55	1.03	0.81
Gd	6.24	3.35	2.68	3.09	16.1	2.23	2.58	6.03	6.52	8.47	4.92
Dy	5.29	3.49	3.28	3.60	15.3	2.21	2.48	5.53	7.07	8.97	5.74
Er	3.47	2.17	2.44	2.43	10.5	1.47	1.64	3.70	4.86	6.55	3.89
Yb	3.11	2.19	2.42	2.25	9.95	1.31	1.47	3.87	5.75	7.84	4.35
Hf	3.99	2.41	2.88	3.14	13.6	2.60	2.89	4.66	10.3	13.1	6.76
Th	1.93	0.50	2.55	2.53	5.76	1.33	1.53	2.42	4.84	6.63	3.79
U	0.59	0.23	0.84	0.63	2.74	0.68	0.69	1.11	2.40	3.11	1.71
Th/U	3.3	2.2	3.0	4.0	2.1	2.0	2.2	2.2	2.0	2.1	2.2
La/Yb	4.6	3.8	3.4	5.5	3.9	5.9	5.7	4.8	4.9	4.7	5.3

* — номера расплавленных включений в табл. 6; ** — кроме указанных элементов-примесей во включениях определены также (в ppm) 149 V, 95.9 Cu, 0.62 Ta, 1.12 Pb. Минерал-хозяин — оливин во включениях 2, 8, 10 и плагиоклаз в остальных включениях.

Таблица 11. Содержание воды, фтора (мас. %) и элементов-примесей (ppm) в расплавах включений в плагиоклазе и в основной массе пород вулканического центра Горелый

Компонент	Гор-60	Гор-60	Гор-60	Гор-60	Гор-60	Гор-60	Гор-60	Гор-60	Гор-60	Гор-60	Гор-15	Гор-15	Гор-15	Гор-19	Гор-60	Гор-60
	30*	34	37	41	42	45	50	Гор-15	Гор-15	Гор-15	26	27	28	57	**	**
H ₂ O	—	0.40	0.78	0.38	0.72	0.65	0.53	0.73	0.62	0.04	—	—	0.02	—	0.02	0.10
F	0.003	0.020	0.033	0.012	0.036	0.029	0.031	0.054	0.019	0.001	0.173	0.173	1.01	0.173	1.01	1.14
Li	86.6	115	124	220	171	116	36.6	88.2	127	31.7	42.7	127	18.5	42.7	18.5	22.7
Be	1.29	1.69	1.55	1.58	1.46	1.59	1.47	2.03	2.39	1.49	1.82	2.39	—	1.82	—	—
B	30.9	27.5	22.7	29.2	24.2	26.3	21.3	29.2	38.8	17.9	16.2	38.8	—	16.2	—	—
V	174	249	220	159	264	201	272	150	137	44.2	—	137	142	—	142	72.3
Cr	11.2	20.5	17.6	22.5	21.4	17.7	27.9	11.3	14.5	1.62	5.03	14.5	91.3	5.03	91.3	73.1
Cu	425	550	479	937	676	535	571	374	578	312	—	578	92.1	—	92.1	200
Rb	27.5	57.4	52.4	48.4	58.4	54.1	57.5	50.0	42.3	35.6	47.7	42.3	63.2	47.7	63.2	98.4
Sr	534	295	347	370	349	340	345	413	665	329	401	665	498	401	498	496
Y	46.4	42.9	40.7	54.9	43.0	42.8	42.7	39.4	38.5	25.1	37.2	38.5	9.01	37.2	9.01	7.97
Zr	328	287	277	376	326	306	284	277	266	190	379	266	42.9	379	42.9	221
Nb	10.3	9.48	9.24	12.4	10.1	9.92	9.42	9.10	8.97	6.03	9.65	8.97	0.57	9.65	0.57	3.10
Ta	1.43	1.26	1.49	1.78	1.61	1.58	1.99	1.31	2.31	2.35	—	2.31	0.94	—	0.94	1.22
Ba	472	706	744	739	777	730	935	789	824	670	852	824	1660	852	1660	2080
La	21.1	22.9	22.1	30.2	22.8	23.7	23.5	23.5	22.0	17.1	20.5	22.0	3.48	20.5	3.48	7.25
Ce	55.0	54.6	53.6	72.7	57.7	54.7	59.8	57.9	49.9	41.4	50.8	49.9	6.64	50.8	6.64	14.2
Nd	32.6	32.5	31.2	44.7	33.5	33.7	35.5	32.9	32.2	22.5	27.1	32.2	4.94	27.1	4.94	8.11
Sm	7.90	7.94	7.74	10.1	8.33	7.68	8.59	7.95	7.44	5.18	6.33	7.44	1.45	6.33	1.45	1.93
Eu	1.43	1.75	1.85	1.61	1.66	1.65	2.82	1.98	2.66	1.54	1.48	2.66	1.56	1.48	1.56	1.70
Gd	7.48	7.16	7.13	9.01	8.40	5.95	9.09	6.59	6.91	5.44	7.26	6.91	1.97	7.26	1.97	1.05
Dy	7.48	7.30	7.31	9.40	7.58	7.52	7.72	6.84	7.18	4.61	6.67	7.18	1.98	6.67	1.98	1.98
Er	5.18	4.80	4.70	6.35	5.38	5.07	5.12	4.83	4.82	3.23	4.83	4.82	1.05	4.83	1.05	1.08
Yb	5.26	4.66	4.60	6.26	4.90	5.15	4.89	5.15	4.67	3.08	5.02	4.67	0.98	5.02	0.98	1.01
Hf	7.28	7.15	7.14	8.81	8.13	8.07	7.42	7.19	7.18	4.67	8.65	7.18	1.55	8.65	1.55	5.60
Pb	8.19	10.2	11.3	10.2	13.0	11.3	13.6	8.52	11.2	8.23	—	11.2	6.01	—	6.01	13.4
Th	3.21	3.05	3.25	4.23	3.57	3.66	3.31	3.93	2.93	2.93	4.99	2.93	—	4.99	—	1.15
U	1.49	1.41	1.59	2.00	1.64	1.60	1.48	1.71	1.38	1.14	1.97	1.38	0.88	1.97	0.88	0.86
Th/U	2.2	2.2	2.0	2.1	2.2	2.3	2.2	2.3	2.1	2.6	2.5	2.1	—	2.5	—	1.3
La/Yb	4.0	4.9	4.8	4.8	4.7	4.6	4.8	4.6	4.7	5.6	4.1	4.7	3.6	4.1	3.6	7.2

* — номера расплавленных включений в плагиоклазе в табл. 6; ** — основная масса образца (табл. 7).

Таблица 12. Концентрация воды и элементов-примесей (ppm) в плагиоклазе-хозяине образца Гор-60 (1–4), содержащего расплавленные включения с высокими концентрациями калия и фтора (табл. 7), и в плагиоклазе-хозяине из андезитов вулкана Шивелуч (5, 6)

Компонент	1	2	3	4	5	6
	An_{54}	An_{54}	An_{54}	An_{54}	An_{49}	An_{50}
H ₂ O	42	152	109	50	455	163
Li	6.62	5.24	5.64	5.64	3.99	3.17
Be	—	—	0.34	—	—	—
B	—	—	0.34	—	—	—
F	14	98	25	13	8	8
V	9.13	8.40	8.97	8.68	7.13	8.24
Cr	1.82	2.11	1.13	1.04	1.13	16.4
Cu	22.0	15.1	11.0	11.8	12.7	10.1
Rb	1.29	2.60	1.02	1.06	0.86	0.75
Sr	695	689	729	715	1180	1070
Y	0.27	0.28	0.61	0.35	0.33	0.30
Zr	21.9	18.0	4.51	3.98	4.59	3.53
Nb	0.01	0.01	0.03	0.01	0.02	0.01
Ta	0.11	0.08	0.13	0.13	0.07	0.08
Ba	227	242	215	231	132	188
La	1.82	2.08	1.87	1.73	1.48	2.93
Ce	2.99	3.30	3.29	3.39	2.57	4.73
Nd	1.29	1.38	1.54	1.44	1.27	1.92
Sm	0.19	0.20	0.22	0.31	0.21	0.36
Eu	0.68	0.61	0.69	0.60	0.57	0.80
Gd	0.21	0.18	0.19	0.09	0.07	0.19
Dy	0.11	0.10	0.11	0.08	0.07	0.10
Er	0.05	0.05	0.02	0.08	0.01	0.04
Yb	0.04	0.00	0.01	0.05	0.05	0.03
Hf	0.30	0.27	0.16	0.12	0.13	0.14
Pb	1.07	1.34	0.59	0.52	0.65	0.59
Th	0.004	0.004	0.005	0.002	0.00	0.005
U	0.003	0.09	0.04	0.01	0.01	0.02

Геохимические характеристики разных групп расплавов вулканического центра Горелый. На рис. 7, 8 представлены спайдер-диаграммы для различных расплавов, нормированных к примитивной мантии [22]. В целом, как показывает график на рис. 7г (средние значения для разных типов расплавов), все кривые выглядят сходным образом, примерно одинаков угол наклона графиков, закономерный рост практически всех несовместимых элементов, у всех одни и те же локальные экстремумы. Исключение составляют Sr, содержание которого ниже всего в кислых расплавах (что связано с фракционированием плагиоклаза), Ti, концентрации которого существенно ниже в кислых расплавах (в результате фрак-

ционирования рудной фазы) и Zr, который, напротив, накапливается в наиболее дифференцированных расплавах. Все же прочие геохимические характеристики расплавов, по которым можно судить не о степени дифференцированности, а об источнике расплава, идентичны.

Стоит отметить, что этот источник весьма специфичен. Базитовые расплавы вулкана Горелый обогащены многими несовместимыми элементами относительно средних показателей для основных островодужных расплавов [23, 24], а концентрации некоторых элементов — лития, бора, циркония — не попадают даже в доверительный интервал содержаний. Исключение, пожалуй, составляют базитовые расплавы II типа, которые

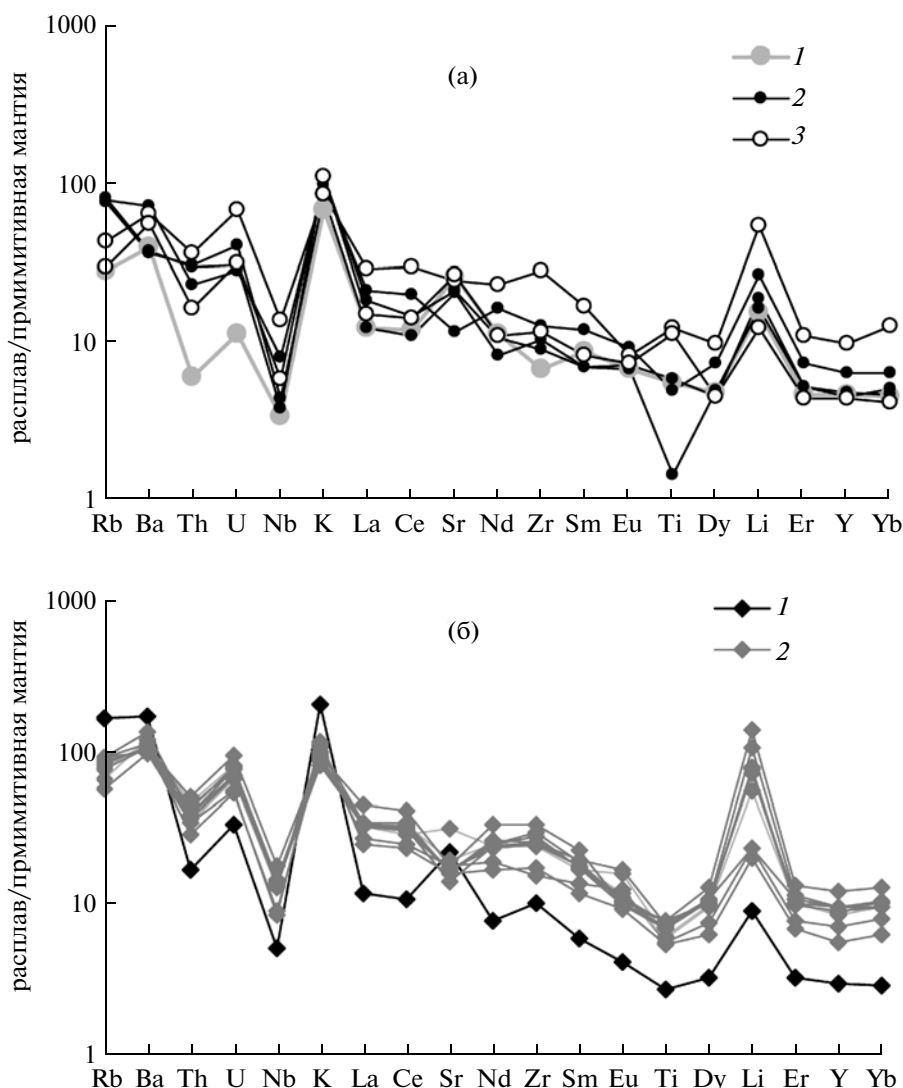


Рис. 7. Спайдер-диаграммы для разных типов расплавов.

a – основные (1–3 – тип расплава, см. рис. 4), *б* – средние (1, 2 – тип расплава, см. рис. 4), *в* – кислые расплавы VII типа: 1 – в дацитах, 2 – в игнимбритах; *г* – средние составы для разных типов расплавов: 1–5 – I–V типы соответственно, 6 – VII тип. Составы нормированы к примитивной мантии [22].

характеризуются пониженными содержаниями тория и урана, близкими к типичным для ОД (рис. 7). Эти же расплавы содержат LILE в количестве, минимальном для вулкана Горелый. Поскольку все эти элементы считаются флюид-мобильными, то можно сделать вывод о том, что в формировании данного расплава флюид принимал минимальное участие.

Средний высококалийевый расплав (IV тип) содержит меньшие количества всех несовместимых элементов, за исключением Ba и Sr. Средние расплавы натровой группы (V тип) характеризуются единообразием, сходными отношениями Ba/Rb, Zr/Hf, Th/U, менее проявленным, по сравнению

с базальтовыми расплавами, Nb минимумом и слабым минимумом титана.

Что касается кислых расплавов, то здесь наблюдается довольно широкий диапазон концентраций Sr и Eu (самые высокие содержания в кислых расплавах из игнимбритов). Кроме того, отчетливо проявлены Zr-максимум и Ti-минимум.

Итак, наблюдается вполне закономерное обогащение всеми фракциями элементов-примесей более кислых разновидностей расплавов по сравнению с более основными. Этот процесс происходит далеко не линейно, и корреляцию между отдельными элементами можно проследить далеко не всегда. Самые четкие тренды дают редкоземельные элементы (рис. 9). Легкие и тяжелые РЗЭ ведут

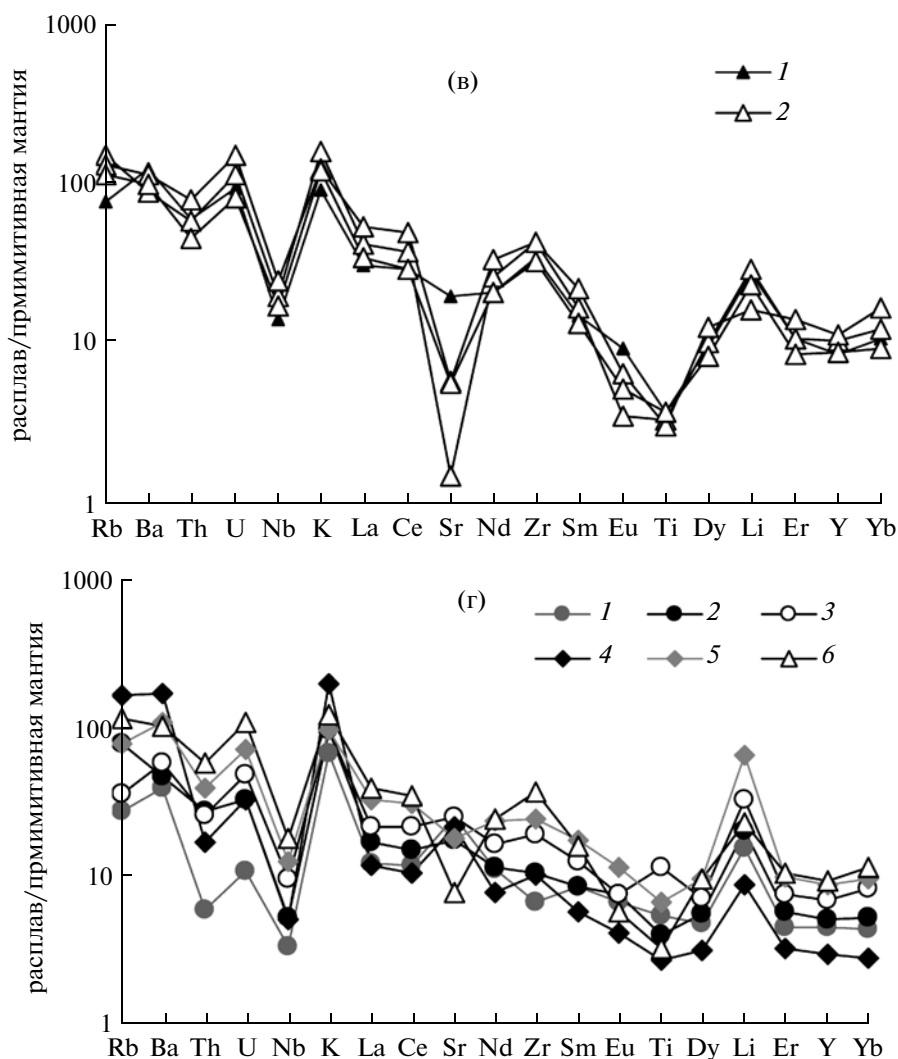


Рис. 7. Продолжение.

себя одинаково, а вот содержания Sm несколько занижены в кислых расплавах. Четкий тренд характерен и для соотношений высоkozарядных элементов. Сложнее ситуация с крупноионными литофильными элементами. Аномальную обогащенность литием демонстрируют средние расплавы, а рубидием обогащены калиевые расплавы разной основности.

Магматические источники. Для выявления возможных источников расплавов стоит сконцентрировать внимание на основных расплавах Горелого как наиболее примитивных членах серии. Надо отметить, что эти расплавы довольно специфичны. Отношения элементов-примесей в расплавах Горелого отличаются от канонических для базитовых расплавов островных дуг [23, 25, 26]: более заметен дефицит тяжелых РЗЭ (La/Yb 3.4–5.1), а также выше отношения Th/Yb и Nb/Yb

(до 1.12 и до 2.6 соответственно), ниже отношение Th/Ta (~2).

Различия в геохимии основных расплавов I и II типов в сочетании с признаками их глубинного происхождения (высокие концентрации Mg и Cr) предполагают литологическую неоднородность субстрата. Однако для обоснованных выводов у нас имеется недостаточное количество данных (в особенности по натровым базитовым расплавам).

Оценка возможных магматических источников (рис. 10) демонстрирует, что расплавы Горелого по соотношению некоторых микроэлементов ближе всего к смешанному мантийно-коровому источнику, характерному для островных дуг; причем, по-видимому, мантийная составляющая содержит примесь обогащенного ОИВ-компонента. В работе [6] сделан сходный вывод о том, что породы Горелого лежат на линии смешения двух — субдукционной и внутримантийной — составляю-

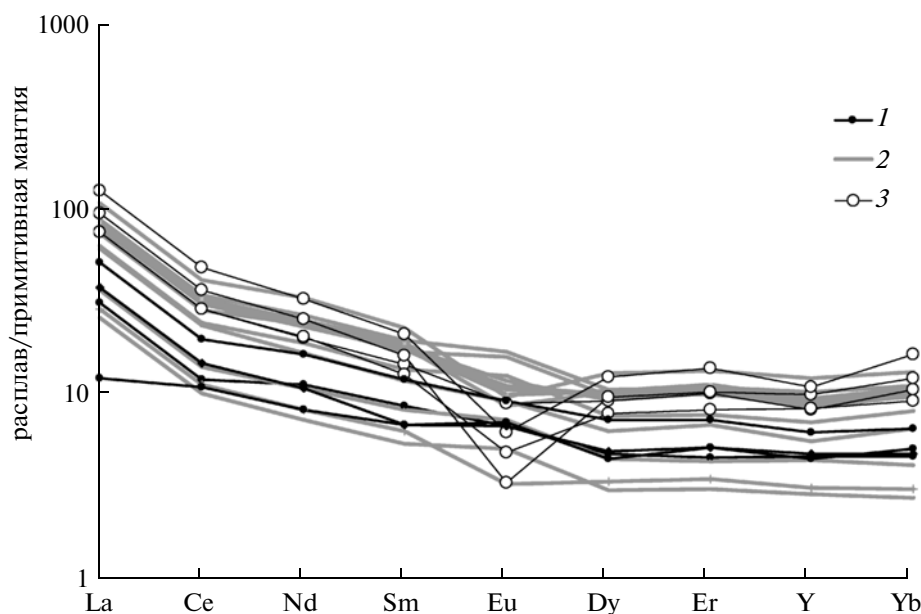


Рис. 8. Спайдер-диаграммы для редкоземельных элементов в разных типах расплавов. 1 — основные, 2 — средние, 3 — кислые расплавы.

щих при высоких степенях плавления вещества и при значительном влиянии субдукционного компонента.

При сравнении среднего состава базитовых расплавов вулкана Горелый со средними составами основных расплавов различных геодинамических обстановок [23] выявляется обогащенность первых относительно типичных островодужных расплавов (рис. 11). Спайдердиаграмма расплавов вулкана Горелый по содержаниям элементов ближе к внутриплитным расплавам, хотя типичные островодужные черты кривой распределения сохраняются (дефицит Nb, максимум K).

Действительно, можно предположить, что в магмогенезисе принимали участие обогащенные источники внутриплитного типа; впрочем, сходную обогащенность демонстрирует средний состав разреза осадочной толщи Камчатской субдукционной зоны (KSSC) [28]. Нельзя не учитывать и возможность обогащения расплавов LILE фракцией, а также торием и ураном за счет флюидной переработки субстрата.

Следует отметить, что высококалиевые разновидности расплавов весьма распространены на вулкане Горелый, но они встречаются и на многих других объектах Курило-Камчатского региона. В табл. 13 мы свели все опубликованные данные по вулканическим породам Курило-Камчатского региона, при исследовании которых обнаружены расплавные включения с высоким содержанием K_2O ($K_2O/Na_2O > 1$). На основании этих данных можно сделать вывод о широком распространении высококалиевых расплавов, которые встречены

на вулканах Авачинский, Безымянный, Большой Семьячек, Дикий Гребень, Карымский, Кекукнайский, Кудрявый, Шивелуч, а также в хребтах Валагинский и Тумрок. В качестве субстрата для таких расплавов предполагается участие флогопит-содержащих мантийных перидотитов [6, 40].

Однако, основные расплавы с повышенным содержанием калия все же не столь обычны — они обнаруживаются, главным образом, в древних (меловых) породах Восточной и Западной Камчатки (Валагинский хребет, Тумрок, Кекукнайский массив, таб. 13); их появление связывают со сменой геодинамических режимов и вовлечением в магмогенезис более глубоких мантийных зон в обстановке рифтогенеза [6].

Что же касается современных вулканов, то высококалиевые базиты зафиксированы лишь на Курилах [36], а все остальные проявления калиевого вулканизма связаны с более дифференцированными расплавами. Итак, Горелый — это единственный из современных вулканов Камчатки, расположенный в непосредственной близости от Восточного вулканического фронта, на котором обнаружены основные расплавы с высокими содержаниями калия. Стоит отметить, что эти расплавы обогащены и фтором, поэтому присутствие флогопит-содержащих пород в качестве источника расплавов более чем вероятно [17, 18].

В последние годы при изучении расплавных включений в оливинах и плагиоклазах такие же высококалиевые расплавы были обнаружены в островных дугах или в активных континентальных окраинах и в других регионах мира: в запад-

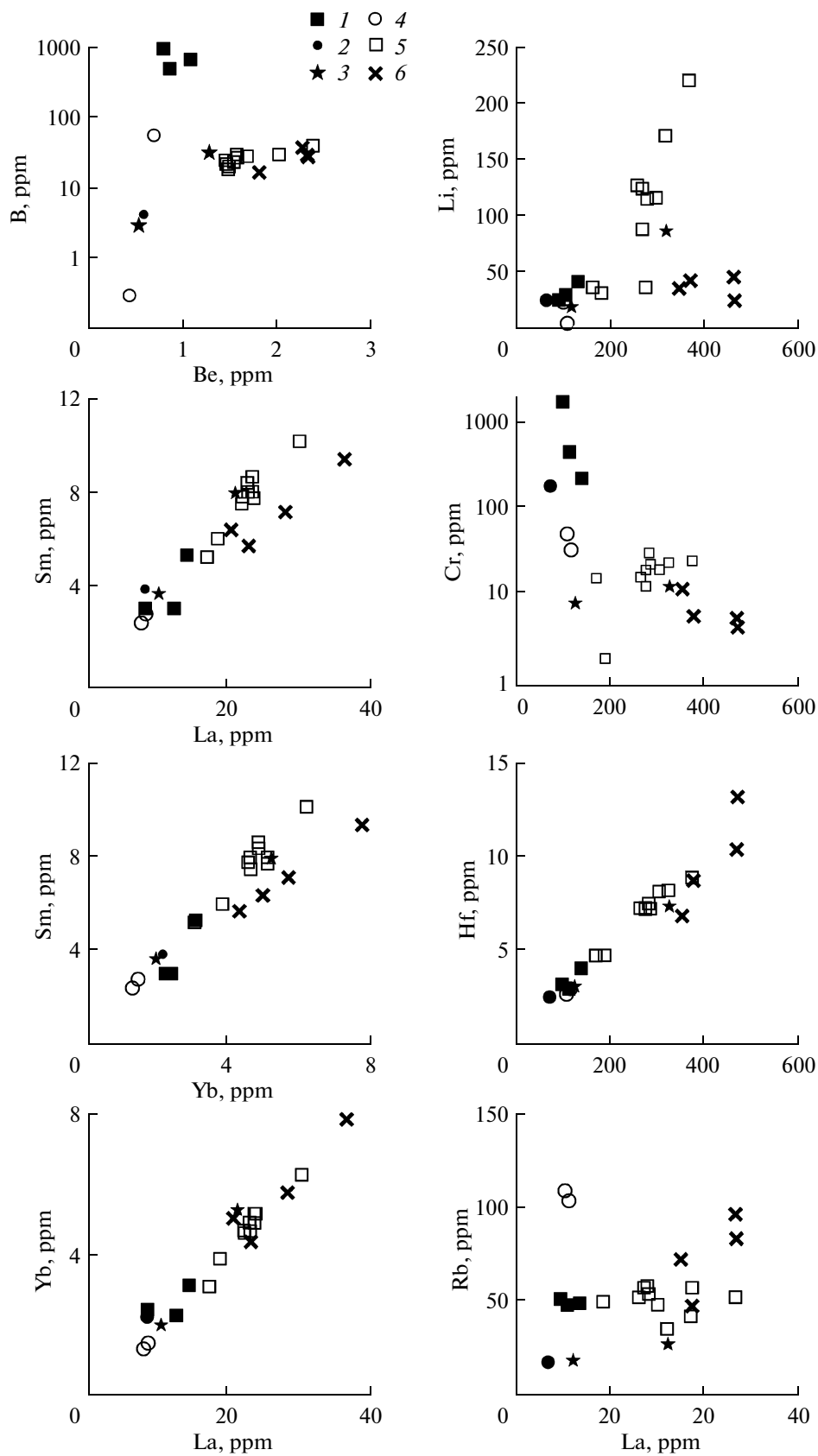


Рис. 9. Вариационные диаграммы для микроэлементов в различных типах расплавов.
1–6 – типы расплавов: 1–5 – I–V типы соответственно, 6 – VII тип.

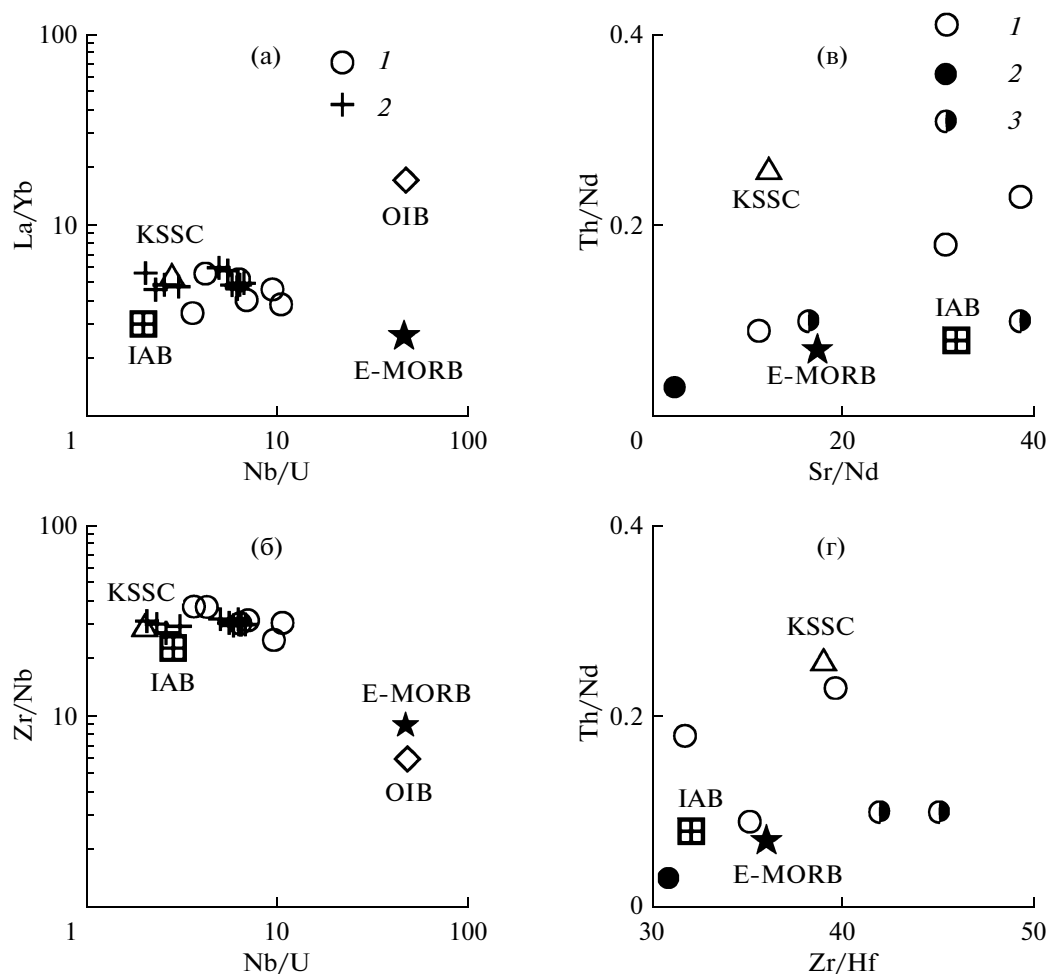


Рис. 10. Соотношение расправов основного и среднего составов вулканического центра Горелый и нормативных составов магматических источников.

а, б: 1 – расправы основного состава, 2 – расправы среднего состава; *г, з:* 1–3 – расправы основного состава I–III типов соответственно. Нормативные составы: MORB (базальты океанических хребтов), OIB (базальты океанических островов) [25], IAB (островодужные базальты) [27], KSSC (средний состав осадочной толщи Камчатки) [28].

ной части Мексиканского вулканического пояса [41, 42], в центральной части рифта Рио Гранде [43], в магматической системе Санта Рита, Нью Мехико, США [44] и в вулкане Соуфриер Хиллс, Малые Антильские острова [45].

Геологическая история вулканического центра Горелый. При сопоставлении составов включений из разных минералов и составов пород можно сделать попытку реконструкции истории вулканического центра Горелый.

1. Самыми ранними породами Горелого (из имеющейся коллекции) можно считать игмбрииты Гор-19 (кальдерообразующая стадия). Это гибридные породы, сформированные при участии расплавов IV, V, VI и VII типов. Можно предположить, что в позднем миоцене, на заключительной стадии существования Пра-Горелого очаг был заполнен кислым расплавом ($\text{SiO}_2 > 64$ мас. %) и вкрапленниками, кристаллизо-

вавшимися из расплавов кислого и среднего составов. Почти одновременно (на стадии пра-Горелого или вскоре после образования кальдеры) происходит излияние глубинных высокомагнезиальных базальтов, формировавшихся из расплавов I и II типов, в том числе, и высококальциевых.

Таким образом, возможно, обогащение магматической системы Горелого калием происходило еще на стадии первичных мантийных выделок, и кислые расплавы в очаге наследуют эту особенность. Однако включения магнезиальных базитовых расплавов в породах вулкана Горелый не обнаружены нигде, кроме обр. Гор-161 – в лавовом потоке бокового мелкого прорыва. Не исключено, что именно эти магмы совершенно не взаимодействовали с содержимым очага и поднимались по побочному магматическому каналу. Действительно, расплавы I и II типов среди расплавов Го-

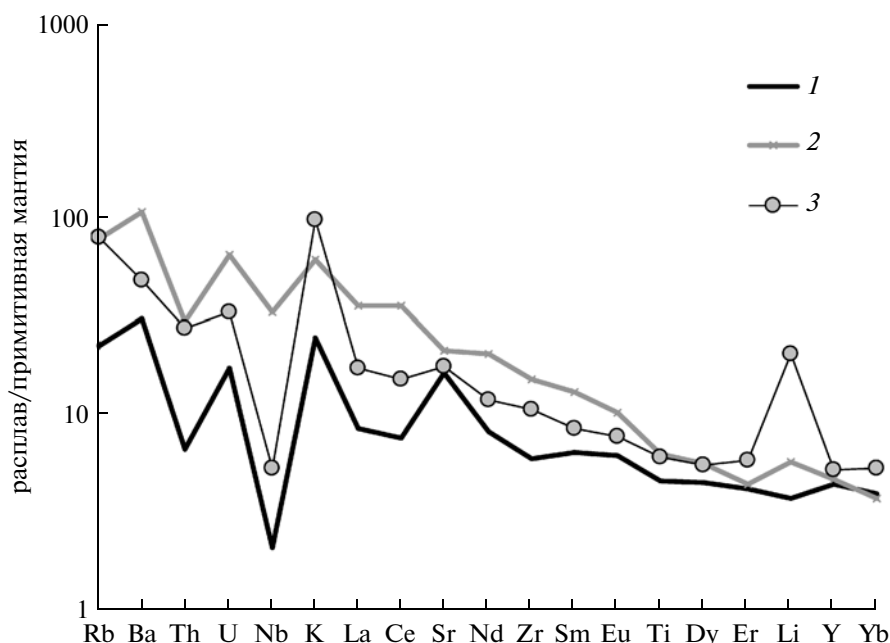


Рис. 11. Спайдер-диаграмма для среднего состава редкоземельных элементов в основных расплавах различных геодинамических обстановок [23] и вулкана Горелый.

1 – базальтовые расплавы островных дуг, 2 – базальтовые расплавы внутриконтинентальных обстановок, 3 – базальтовые расплавы вулкана Горелый.

релого смотрятся чужеродно. Однако с вулканидами ближайшего базитового центра Мутновский [28] сходства эти расплавы тоже не обнаруживают. Таким образом, можно допустить принадлежность магнезиальных расплавов магматической системе вулканического центра Горелый.

2. Опустошенный излияниями игнимбритов очаг заполняется кислыми довольно однородными расплавами натровой группы (тип VII); этот этап сопровождается извержениями дацитов Гор-11. Не исключено, что эти кислые расплавы ($\text{SiO}_2 > 70\%$) – результат крайней степени дифференциации расплавов, формировавших игнимбриды. Любопытно, что калиевая специфика на этой стадии не проявлена (по крайней мере, в дацитах посткальдерной стадии калиевых расплавов не обнаружено).

3. В результате структурной перестройки магматической системы начинается извержение Молодого Горелого. Продукты извержения новых конусов – андезиты и андезитобазальты (Гор-60, 15, 46, 188) отчетливо гибридного генезиса. Эти породы сформированы в результате кристаллизации средних расплавов натровой линии (тип V), а также совсем незначительной примесью вкрапленников с включениями среднего калиевого расплава (тип IV) либо основного расплава (тип III). Средний расплав (тип V), предположительно, мог быть результатом жидкостного смешения кислого натрового расплава, характерного для предыдущего этапа существования вулкана, и

базитового высокотитанистого расплава, гораздо менее глубинного и более дифференцированного, нежели чем магнезиальные базальтовые расплавы I и II типов. Впрочем, возможно, и эти расплавы (тип II) также участвовали в смешении. Поскольку основность вулканитов в течение голоцена несколько раз повышалась, можно предположить, что порции базитовых магм неоднократно пополняли очаг.

Интересно, что геохимические характеристики расплавов не менялись в течение всего описанного периода – следовательно, не было и смены магматических источников. Единственное свидетельство направленной эволюции – это резкое снижение роли калиевых расплавов с течением времени. Возможно, это свидетельство изменения флюидного режима – уменьшения степени флюидного метасоматоза субстрата.

Кроме того, характерной особенностью расплавов Молодого Горелого можно считать аномальную обогащенность литием. Если считать, что литий имеет исключительно коровое происхождение [46] и поступает в приповерхностный очаг с дезинтегрированными фрагментами кровли, то можно предположить повышение роли контаминации в образовании голоценовых вулканитов Горелого.

Таблица 13. Химический состав (мас. %) стекол расплавных включений в минералах и стеклах основной массы вулканических пород Курило-Камчатского региона, в которых отношение $K_2O/Na_2O > 1$

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cl	Сумма	MX*
68.72	0.20	16.22	1.64	0.09	0.30	4.02	2.70	5.71	0.07	0.08	99.75	An ₅₇ **
55.87	0.16	19.44	3.02	0.14	5.17	7.13	3.23	5.73	-	0.01	99.90	An ₅₁
56.30	0.58	17.76	4.97	0.08	1.73	6.45	4.56	4.90	0.28	0.06	97.77	An ₇₀
64.80	0.28	16.85	2.51	0.06	1.74	4.01	3.37	5.77	0.08	0.00	99.47	An ₆₅
65.67	0.23	15.78	1.48	0.05	0.24	3.98	3.96	5.43	0.12	0.13	97.07	An ₆₀
66.07	0.26	17.49	2.59	0.01	0.36	4.72	5.23	5.24	0.10	0.00	102.08	An ₆₀
71.78	0.36	13.48	1.09	0.04	0.17	1.42	3.29	6.65	0.03	0.00	98.31	An ₄₉
75.11	0.56	11.02	1.52	0.04	0.19	0.85	2.94	4.39	0.10	0.00	96.72	An ₅₃
72.01	0.51	12.80	2.30	-	0.75	2.28	3.40	4.75	-	-	98.80	Gl
74.80	0.00	12.03	0.52	-	0.05	0.36	3.10	5.35	-	-	96.21	Gl
74.87	0.18	12.23	0.94	-	0.14	0.68	4.22	4.54	-	-	97.80	Gl
76.34	0.00	11.60	0.30	-	0.00	0.27	3.00	6.03	-	-	97.54	Gl
45.57	0.61	9.60	8.66	0.15	21.44	8.21	1.83	2.62	0.46	-	99.15	Ol
53.60	0.77	12.84	6.91	0.10	9.50	6.33	3.51	3.56	0.74	-	97.86	Ol
58.63	0.76	18.01	3.30	0.11	1.99	4.70	4.17	5.17	0.44	-	97.28	Cpx
57.06	1.92	13.27	8.51	0.00	2.49	4.20	1.64	3.92	-	-	93.01	An ₅₀
57.67	1.84	13.08	8.42	0.00	2.41	4.45	2.31	4.01	-	-	94.19	An ₅₀
60.89	1.54	13.87	8/45	0.00	1.45	3.81	2.57	5.05	-	-	97.63	Gl
63.75	1.60	14.04	8.62	0.00	1.60	3.92	1.78	5.28	-	-	100.59	Gl
67.62	0.01	20.13	0.90	0.00	0.04	3.04	2.89	5.21	-	-	99.84	Gl
70.00	0.66	16.82	1.07	0.03	0.00	0.50	3.72	6.53	-	-	99.33	Opx
74.15	0.47	13.17	1.49	0.00	0.02	0.72	2.84	5.92	-	-	98.78	Gl
74.86	0.35	10.66	1.12	0.00	0.00	0.10	2.02	6.28	-	-	95.39	Gl
70.31	0.20	13.53	1.33	0.07	0.25	2.42	4.11	5.17	0.01	0.10	97.50	An ₆₃
74.15	0.15	10.23	0.94	0.07	0.20	0.95	2.91	5.21	0.00	0.12	94.93	An ₄₆
74.22	0.32	12.28	1.15	0.03	0.19	1.76	4.57	5.24	0.02	0.14	99.92	An ₆₃
74.99	0.23	10.82	1.11	0.08	0.20	0.49	3.87	5.23	0.00	0.30	97.32	An ₃₇
75.94	0.26	11.27	1.43	0.02	0.25	1.04	3.87	5.49	0.16	0.10	99.83	An ₆₇
76.10	0.13	11.03	0.83	0.08	0.13	0.60	2.87	5.17	0.05	0.31	97.30	An ₃₂
76.13	0.24	10.95	1.65	0.01	0.35	1.22	3.80	5.47	0.03	0.12	99.97	An ₅₉
76.16	0.26	9.93	1.28	0.00	0.18	0.72	2.83	5.37	0.02	0.09	96.84	An ₃₉
76.53	0.22	10.80	0.91	0.04	0.06	0.50	3.24	5.17	0.02	0.26	97.75	An ₃₇
76.91	0.21	10.83	0.95	0.06	0.21	0.62	3.26	5.27	0.01	0.30	98.63	An ₃₇
77.08	0.30	11.06	1.26	0.03	0.20	0.95	3.41	5.60	0.06	0.10	100.05	An ₆₁
77.16	0.19	11.68	0.74	0.01	0.10	0.99	4.06	5.09	0.04	0.17	100.23	An ₄₁
75.55	0.34	12.39	4.96	0.06	0.83	0.16	0.45	4.17	-	-	98.91	An ₄₅

Таблица 13. Окончание

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cl	Сумма	МХ*
77.08	0.31	12.09	2.02	0.08	0.74	0.21	0.59	4.94	—	—	98.06	An ₄₅
78.08	0.23	11.88	1.18	0.07	0.59	0.20	1.01	4.80	—	—	98.04	An ₄₀
78.63	0.30	11.52	1.25	0.00	0.54	0.11	0.93	5.00	—	—	98.28	An ₄₅
55.44	0.86	17.67	5.45	0.09	3.72	8.15	2.64	5.95	0.11	0.01	100.09	An ₈₂
72.83	0.11	12.51	0.51	0.06	0.12	0.66	3.32	3.82	0.04	0.11	94.09	Q
73.28	0.12	12.98	0.57	0.07	0.16	0.88	3.60	3.74	0.00	0.10	95.50	Q
74.02	0.09	12.44	0.54	0.13	0.06	0.62	3.72	3.92	0.06	0.11	95.71	Q
75.67	0.11	12.83	0.67	0.11	0.10	0.68	3.64	4.12	0.04	0.10	98.07	Q
65.43	1.01	14.99	4.75	—	1.34	3.54	3.37	4.81	—	—	99.24	Gl
66.09	0.82	14.83	4.38	—	1.15	2.91	3.39	6.22	—	—	99.79	Gl
66.36	0.72	15.01	3.75	—	1.03	2.27	2.89	6.64	—	—	98.67	Gl
74.33	0.12	11.72	1.11	—	0.23	0.38	3.66	4.90	—	—	96.45	Gl
51.17	1.73	15.2	11.4	—	5.31	6.66	3.09	4.13	—	—	98.69	Ol
52.76	1.15	17.31	9.62	—	4.87	6.36	3.39	5.56	—	—	101.02	Ol
55.26	1.44	19.21	5.10	—	3.27	4.91	3.20	7.16	—	—	99.55	Ol
50.18	2.30	15.36	6.29	—	5.76	11.06	3.00	3.68	—	—	97.63	Cpx
54.07	0.85	14.29	6.32	—	5.32	8.80	2.27	5.16	—	—	97.08	Cpx
55.07	0.83	14.28	6.08	—	5.17	8.77	3.08	5.27	—	—	98.55	Cpx
51.45	0.53	17.93	6.48	0.21	4.07	12.85	3.16	3.76	0.16	0.02	100.62	An ₇₂
53.00	0.29	19.92	2.64	0.07	7.97	7.28	1.71	4.95	0.10	0.03	97.96	An ₈₉
61.66	0.78	17.86	3.84	0.07	0.75	6.38	3.03	5.13	0.36	0.11	99.97	An ₇₇
61.88	0.73	15.13	4.70	0.09	0.84	6.19	2.96	6.92	0.37	0.15	99.96	An ₇₀
63.02	0.81	16.22	4.53	0.13	1.43	5.99	3.19	3.67	0.15	0.13	99.27	An ₆₉
63.32	0.88	15.09	4.49	0.13	0.97	6.52	2.81	5.68	0.34	0.15	100.38	An ₇₇
63.56	0.82	15.43	4.35	0.11	0.85	5.01	2.76	6.76	0.15	0.01	99.81	An ₈₃
64.00	0.81	13.48	3.36	0.12	1.31	3.68	2.77	6.22	0.30	0.09	96.14	An ₆₂
66.60	1.34	13.81	4.21	0.17	1.26	5.51	2.52	3.86	0.36	0.10	99.74	An ₇₃
66.71	0.84	14.06	4.77	0.13	0.83	4.01	3.10	5.87	0.15	0.01	100.48	An ₈₃
69.33	0.91	11.51	4.54	0.14	1.40	4.14	1.55	5.40	0.18	0.09	99.22	An ₇₅
69.36	0.91	11.51	4.54	0.14	1.40	4.14	1.55	5.40	0.18	0.09	99.22	An ₇₅
52.00	0.54	17.34	9.20	0.16	4.38	9.35	3.02	3.24	0.27	—	99.50	Cpx
52.79	0.40	16.20	8.31	0.20	4.68	9.62	3.09	3.56	0.47	—	99.32	Cpx
53.84	0.33	15.92	8.30	0.17	4.75	8.81	2.84	4.40	0.30	0.38	100.04	Cpx
54.09	0.32	15.53	8.62	0.20	4.46	9.10	2.65	4.21	0.31	—	99.49	Cpx
71.03	0.17	14.59	1.34	0.04	0.23	1.72	2.77	6.47	—	—	98.36	An ₄₃
71.58	0.17	12.08	0.97	0.04	0.27	0.84	4.18	4.43	—	0.16	94.72	An ₄₃
74.36	0.25	13.23	1.43	0.02	0.91	1.24	3.32	4.31	—	0.09	99.16	Amph
75.98	0.18	13.32	0.80	0.01	0.24	0.69	3.67	4.52	—	0.09	99.50	Amph

Примечание. * — минерал-хозяин: An — плагиоклаз, Ol — оливин, Q — кварц, Gl — стекло основной массы, Opx — ортопироксен, Cpx — клинопироксен, Amph — амфибол; An₅₇ — номер плагиоклаза.

ВЫВОДЫ

1. Исследованы расплавные включения во вкрапленниках оливина и плагиоклаза из разновозрастных пород вулканического центра Горелый (Южная Камчатка): магнезиального базальта, андезитобазальтов, андезита, игнимбрита и дацита. Использован метод гомогенизации включений и анализ стекол 100 расплавных включений на электронном микрозонде и 24 включений на ионном микрозонде. Выделено 7 типов расплавов, различающихся по содержаниям кремния, натрия, калия, титана и фосфора. Среди расплавов основного состава (45–53 мас. % SiO_2) обнаружены калиевые (в среднем 4.2% K_2O , 1.7% Na_2O , 1.0% TiO_2 , 0.20% P_2O_5), натровые (3.2% Na_2O , 1.1% K_2O , 1.1% TiO_2 , 0.40% P_2O_5) и титанистые с высоким содержанием фосфора (2.2% TiO_2 , 1.1% P_2O_5 , 3.8% Na_2O , 3.0% K_2O). Среди расплавов среднего состава (53–64 мас. % SiO_2) также встречаются как калиевые (5.6% K_2O , 3.4% Na_2O , 1.0% TiO_2 , 0.4% P_2O_5), так и натровые (4.3% Na_2O , 2.8% K_2O , 1.3% TiO_2 , 0.4% P_2O_5). Среди расплавов кислого состава (64–74 мас. % SiO_2) имеются калиевые (4.5% K_2O , 3.6% Na_2O , 0.7% TiO_2 , 0.15% P_2O_5) и натровые (4.5% Na_2O , 3.1% K_2O , 0.7% TiO_2 , 0.13% P_2O_5).

2. Отличительной чертой вулканического центра Горелый является постоянное присутствие высококалиевых разностей во всем диапазоне кремнекислотности расплавов. Включения расплавов разных типов иногда обнаруживаются не только в одном и том же образце, но и в одних и тех же вкрапленниках. Натровые и калиевые типы расплавов различаются также по содержаниям хлора и фтора: в натровых расплавах больше хлора, а калиевые расплавы существенно обогащены фтором. Впервые для Курило-Камчатского региона установлены калиевые расплавы с очень высоким содержанием фтора — до 2.7 мас. % при среднем содержании 1.19 мас. % (17 анализов). Для натровых расплавов среднее содержание фтора равно 0.16 мас. % (37 анализов).

3. Микроэлементный состав расплавов отличается обогащенностью элементами разных групп — крупноионными литофилами (LILE), редкоземельными (особенно HREE) элементами, высокозарядными элементами (кроме Nb). В целом, все расплавы несут черты геохимического родства. Концентрации элементов закономерно возрастают от основных расплавов к кислым (за исключением содержаний Sr и Eu, что объясняется активным фракционированием плагиоклаза, а также Ti, входящего в рудную фазу).

4. Процессы, при помощи которых можно объяснить многообразие расплавов и пород вулкана Горелый, сложны и многообразны: смешение магм и расплавов, фракционирование, контаминация коровым материалом.

5. Сведены все опубликованные данные по вулканическим породам Курило-Камчатского региона, при исследовании которых встречены расплавные включения с высоким содержанием K_2O ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1$). Сделан вывод о широком распространении высококалиевых расплавов, которые обнаружены на вулканах Авачинский, Безымянный, Большой Семейек, Дикий Гребень, Карымский, Кекунайский, Кудрявый, Шивелуч, а также в хребтах Валагинский и Тумрок.

Авторы признательны Н.Л. Миронову и П.Ю. Плечову за ценные замечания к рукописи статьи и обсуждение материалов исследования. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 10-05-00209).

Авторы признательны Н.Л. Миронову и П.Ю. Плечову за ценные замечания к рукописи статьи и обсуждение материалов исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 10-05-00209).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирсанов И.Т., Мелекесцев И.В. Вулкан Горелый / В кн.: Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. Т. 2. С. 294–315.
2. Селянгин О.Б., Пономарева В.В. Строение и развитие Гореловского вулканического центра, Южная камчатка // Вулканология и сейсмология. 1999. № 2. С. 3–23.
3. Чашин А.А. Игнимбриты вулкана Горелого (Южная Камчатка): состав, условия формирования / Труды ДВГТУ. Владивосток. 1999. Вып. 121. Сер. 4. С. 142–148.
4. Хетчиков Л.Н., Пахомова В.А., Чашин А.А., Одариченко Э.Г. Особенности состава силикатных стекол расплавных включений в минералах и основной массе пород вулкана Горелый (Южная Камчатка) // Труды ВНИИСИМС. 2000. Т. XVI. С. 322–336.
5. Хетчиков Л.Н., Чашин А.А., Пахомова В.А., Одариченко Э.Г. Вкрапленники плагиоклаза в базальтах вулканов Горелый и Мутновский (юг Камчатки) и условия их образования по данным изучения расплавных включений / Труды X Международной конференции по термобарогеохимии, Александров, ВНИИСИМС. 2001. С. 111–140.
6. Геодинамика, магматизм и металлогения Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2006. Книга 1. 572 с.
7. Gavrilenko M.G., Ozerov A.Y., Kyle P.R., Eichelberger J.C. Petrological and geochemical characteristics of magmatic melts at Gorely volcano, Kamchatka, Russia / AGU Fall Meeting 2006. Eos Trans. AGU. 2006. Abstract/V11A-0558.
8. Duggen S., Portnyagin M., Baker J., Ulfback D., Hoernle K., Garbe-Schonberg D., Grassineau N. Drastic shift in lava geochemistry in volcanic front to rear-arc region of the Southern Kamchatkan subduction zone: Evidence for the transition from slab surface dehydration to sediment melting // Geochim. Cosmochim. Acta. 2007. V. 71. P. 452–480.
9. Гавриленко М.Г., Озеров А.Ю. Вулкан Горелый — эволюция магматических расплавов / Материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и

- палеовулканологии, 22–27 сентября 2009. Петропавловск-Камчатский. 2009. Т. 1. С. 308–310.
10. Шарпенко Л.Н., Кухаренко Е.А., Костин А.Е. Новые положения петрографического кодекса о вулканогенных образованиях // Вулканология и сейсмология. 2009. № 4. С. 64–80.
 11. Наумов В.Б. Термометрическое исследование включений расплава во вкрапленниках кварца кварцевых порфиров // Геохимия. 1969. № 4. С. 494–498.
 12. Наумов В.Б., Финько В.И. Условия кристаллизации вкрапленников кайнозойских щелочных пемз Приморья // Известия АН СССР. Серия геол. 1976. № 12. С. 91–95.
 13. Соболев А.В. Включения расплавов в минералах как источник принципиальной петрологической информации // Петрология. 1996. Т. 4. № 3. С. 228–239.
 14. Носова А.А., Сазонова Л.В., Наркисова В.В., Симакин С.Г. Элементы-примеси в клинопироксенах из палеозойских вулканитов Тагильской островной дуги Среднего Урала // Геохимия. 2002. № 3. С. 254–268.
 15. Портнягин М.В., Симакин С.Г., Соболев А.В. Фтор в примитивных магмах офиолитового комплекса Троодос (о. Кипр): методика определения и основные результаты // Геохимия. 2002. № 7. С. 691–699.
 16. Толстых М.Л., Наумов В.Б., Богоявленская Г.Е., Кононкова Н.Н. Андезит-дацит-риолитовые расплавы при кристаллизации вкрапленников андезитов вулкана Безымянный, Камчатка // Геохимия. 1999. № 1. С. 14–24.
 17. Соболев А.В., Соболев Н.В., Смит К.Б., Кононкова Н.Н. Новые данные по петрологии оливиновых лампроитов Западной Австралии по результатам исследования магматических включений в оливинах // Доклады Академии Наук СССР. 1985. Т. 284. № 1. С. 196–201.
 18. Sobolev A.V., Sobolev N.V., Smith C.B., Dubessy J. Fluid and melt compositions in lamproites and kimberlites based on the study of inclusions in olivine / In: Proceedings of the Fourth International Kimberlite Conference. Kimberlites and Related Rocks. GSA Special Publication. № 14. 1989. V. 1. P. 220–240.
 19. Рябчиков И.Д., Соловова И.П., Гирнис А.В., Ганев И.И., Когарко Л.Н., Наумов В.Б. Условия генерации и кристаллизации высококалийевых магм / В кн.: Лампроиты. М. Наука. 1991. С. 218–276.
 20. Salvioli-Mariani E., Renzulli A., Serri G., Holm P.M., Toscani L. Glass-bearing crustal xenoliths (buchites) erupted during the recent activity of Stromboli (Aeolian Island) // Lithos. 2005. V. 81. P. 255–277.
 21. Nikogosian I.K., van Bergen M.J. Heterogeneous mantle sources of potassium-rich magmas in central-southern Italy: Melt inclusion evidence from Roccamonfina and Ernici (Mid Latina Valley) // J. Volcan. Geotherm. Res. 2010. V. 197. P. 279–302.
 22. Sun S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes / In: Saunders, A.D., Norry, M.J. (Eds.), Magmatism in the Ocean Basins, 1989. V. 42. Geological Society. P. 313–345.
 23. Наумов В.Б., Коваленко В.И., Дорофеева В.А., Гирнис А.В., Ярмолюк В.В. Средний состав магматических расплавов главных геодинамических обстановок по данным изучения расплавных включений в минералах и закалочных стеклах пород // Геохимия. 2010. № 12. С. 1266–1288.
 24. Коваленко В.И., Наумов В.Б., Гирнис А.В., Дорофеева В.А., Ярмолюк В.В. Средний состав базитовых магм и мантийных источников островных дуг и активных континентальных окраин по данным изучения расплавных включений и закалочных стеклов пород // Петрология. 2010. Т. 18. № 1. С. 3–28.
 25. Коваленко В.И., Наумов В.Б., Гирнис А.В., Дорофеева В.А., Ярмолюк В.В. Канонические отношения элементов-примесей в базитовых магмах различных геодинамических обстановок (оценка по составам расплавных включений и стеклов пород) // Доклады РАН. 2009. Т. 426. № 2. С. 222–225.
 26. Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Ковач В.П., Коваленко Д.В., Козловский А.М., Андреева И.А., Котов А.Б., Сальникова Е.Б. Вариации изотопного состава неодайма и канонических отношений содержаний несовместимых элементов как отражение смешения источников щелочных гранитоидов и базитов Халдзан-Буреттейского массива и одноименного редкометального месторождения, Западная Монголия // Петрология. 2009. Т. 17. № 3. С. 249–275.
 27. McCulloch M.T., Gamble J.A. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism // Earth Planet. Sci. Lett. 1991. V. 102. P. 358–374.
 28. Duggen S., Portnyagin M., Baker J., Ulfback D., Hoernle K., Garbe-Schonberg D., Grassineau N. Drastic shift in lava geochemistry in volcanic front to rear-arc region of the Southern Kamchatkan subduction zone: Evidence for the transition from slab surface dehydration to sediment melting // Geochim. Cosmochim. Acta. 2007. V. 71. P. 452–480.
 29. Толстых М.Л., Бабанский А.Д., Наумов В.Б., Базанова Л.И., Кононкова Н.Н. Химический состав, элементы-примеси и летучие компоненты расплавных включений в минералах андезитов вулкана Авачинский, Камчатка // Геохимия. 2002. № 11. С. 1229–1237.
 30. Леонов В.Л., Гриб Е.Н. Структурные позиции и вулканизм четвертичных кальдер Камчатки. Владивосток: Дальнаука, 2004. 189 с.
 31. Соболев А.В., Каменецкий В.С., Кононкова Н.Н. Новые данные по петрологии и геохимии ультрамафических вулканитов Валагинского хребта (Восточная Камчатка) // Геохимия. 1989. № 12. С. 1694–1709.
 32. Толстых М.Л., Наумов В.Б., Кононкова Н.Н. Состав магм, формировавших дациты вулкана Дикий Гребень (Южная Камчатка), по данным изучения расплавных включений // Геохимия. 2000. № 10. С. 1116–1121.
 33. Хетчиков Л.Н., Пахомова В.А., Попов В.К., Чащин А.А., Сапин В.И. Состав расплавных включений в минералах и температурный режим формирования пород вулкана Дикий Гребень (Камчатка) // Тихоокеанская геология. 2000. Т. 19. № 4. С. 3–11.

34. Наумов В.Б., Толстых М.Л., Гриб Е.Н., Леонов В.Л., Кононкова Н.Н. Химический состав, летучие компоненты и элементы-примеси расплавов Карымского вулканического центра (Камчатка) и вулкана Головинина (о. Кунашир) по данным изучения включений в минералах // Петрология. 2008. Т. 16. № 1. С. 3–20.
35. Babansky A., Solovova I. Mineralogy and geochemistry of K-rich basalts of the central part of the Sredinnyi Range, Kamchatka / Geochemistry of Magmatic Rocks. XXVI Intern. Conf. School "Geochemistry of Alkaline Rocks". Moscow. 2009. P. 19–20.
36. Коваленко В.И., Наумов В.Б., Толстых М.Л., Царева Г.М., Кононкова Н.Н. Состав и источники магм кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Южные Курилы) по данным изучения расплавных включений // Геохимия. 2004. № 5. С. 467–487.
37. Каменецкий В.С., Портнягин М.В., Соболев А.В., Данышевский Л.В. Условия кристаллизации и состав расплава пикрит-базальтовой толщи хребта Тумрок (Восточная Камчатка) // Геохимия. 1992. № 8. С. 1133–1148.
38. Толстых М.Л., Наумов В.Б., Бабанский А.Д., Хубуная С.А., Кононкова Н.Н. Состав расплава и условия кристаллизации андезитов вулкана Шивелуч (Камчатка) по данным изучения включений в минералах // Доклады РАН. 1998. Т. 359. № 5. С. 676–679.
39. Tolstykh M.L., Naumov V.B., Babanskii A.D., Khubunaya S.A., Kononkova N.N. Chemical Composition, Trace Elements, and Volatile Components of Melt Inclusions in Minerals from Andesites of the Shiveluch Volcano, Kamchatka // Geochemistry International. 2000. V. 38. Suppl. 1. P. S123–S132.
40. Foley S.F., Venturelli G., Green D.H., Toscan L. The ultrapotassic rocks: Characteristics, classification, and constraints for petrogenetic models // Earth-Science Reviews. 1987. V. 24. P. 81–134.
41. Maria A.H., Luhr J.F. Lamprophyres, Basanites, and Basalts of the Western Mexican Volcanic Belt: Volatile Contents and a Vein-Wallrock Melting Relationship // J. Petrology. 2008. V. 49. № 12. P. 2123–2156.
42. Vigouroux N., Wallace P.J., Kent A.J.R. Volatiles in high-K magmas from the western Trans-Mexican Volcanic Belt: Evidence for fluid fluxing and extreme enrichment of the mantle wedge by subduction processes // J. Petrology. 2008. V. 49. № 9. P. 1589–1618.
43. Rowe M.C., Lassiter J.C. Chlorine enrichment in central Rio Grande Rift basaltic melt inclusions: Evidence for subduction modification of the lithospheric mantle // Geology. 2009. V. 37. № 5. P. 439–442.
44. Audetat A., Pettke T. Evolution of a porphyry-Cu mineralized magma system at Santa Rita, New Mexico (USA) // J. Petrology. 2006. V. 47. № 10. P. 2021–2046.
45. Humphreys M.C.S., Edmonds M., Christopher T., Hards V. Magma hybridization and diffusive exchange recorded in heterogeneous glasses from Soufriere Hills Volcano, Montserrat // Geophysical Research Letters. 2010. V. 37. L00E06, doi:10.1029/2009GL041926.
46. Портнягин М.В., Наумов В.Б., Миронов Н.Л., Белоусов И.А., Кононкова Н.Н. Состав и эволюция расплавов извержения 1996 года в Карымском озере (Восточная Камчатка) по данным изучения включений в минералах // Геохимия. 2011. № 11. С. 1153–1178.